

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

El túnel de vent com eina d'assaig aerodinàmic

MEMÒRIA

Autor: Sergi Barba Espejo

Director: Enric Trillas Gay

Convocatòria: Gener 2016



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



RESUM

“El túnel de vent com eina d'assaig aerodinàmic”, és un estudi fonamentat en la mecànica de fluids mitjançant el qual es pretendrà obtenir els valors dels coeficients de resistència a l'avanç tot introduint diferents cossos de revolució de fusta, cadascun de les quals amb una forma geomètrica diferent, dins un túnel de vent. D'aquesta manera es pretén assolir també una primera presa de contacte amb el túnel de vent, una eina clau present en tot estudi aerodinàmic, tot entenent-ne el seu funcionament.

L'objectiu principal del treball és obtenir valors el més propers possible als que es troben en els llibres especialitzats en aquesta branca de la Mecànica de Fluids, com és l'Aerodinàmica. Es consultaran llibres com ara el “Fluid Mechanics” de Frank M. White o el “Applied Fluid Mechanics” de Robert L. Mott. A més a més, es completarà l'estudi amb una simulació numèrica amb el programa “Ansys CFX”, tot simulant els experiments realitzats amb el túnel de vent. Així doncs, per a cada experiment realitzat amb una forma geomètrica diferent, es procedirà a justificar les possibles discrepàncies obtingudes per grans o petites que siguin.

Al final d'aquest treball s'ha conclòs que, tal i com s'esperava, els resultats obtinguts tant en la simulació com en l'experiment amb el túnel s'ajusten als valors experimentals que mostren els llibres. Les discrepàncies obtingudes s'atribueixen principalment a l'error en l'obtenció de resultats del túnel de vent i a la possibilitat de millorar encara més el mallat en la simulació numèrica.

Així doncs, “El túnel de vent com a eina d'assaig aerodinàmic” abraçarà un fonament teòric experimental de diferents autors i recopilats en diferents llibres, un anàlisi experimental en diferents assajos en el túnel de vent i una simulació numèrica en la resolució de les equacions fonamentals de la Mecànica de Fluids i determinant els camps fluidodinàmics de les velocitats.

SUMARI

| | |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| RESUM | 3 |
| SUMARI | 5 |
| 1. PREFACI | 7 |
| 1.1. Origen i motivació del projecte..... | 7 |
| 1.2. Requeriments previs..... | 7 |
| 2. INTRODUCCIÓ | 8 |
| 2.1. Objectius del projecte..... | 8 |
| 2.2. Abast del projecte | 8 |
| 3. LA MECÀNICA DE FLUIDS | 9 |
| 3.1. Introducció i hipòtesis..... | 9 |
| 3.2. Lleis i equacions que intervenen..... | 9 |
| 3.3. Conceptes bàsics..... | 11 |
| 4. L'AERODINÀMICA | 15 |
| 4.1. Introducció..... | 15 |
| 4.2. Quines són les forces més significatives? | 15 |
| 4.3. Capa límit..... | 18 |
| 4.4. L'efecte de la geometria i del nombre Re en la capa límit | 20 |
| 5. EL TÚNEL DE VENT | 22 |
| 5.1. Història i actuals usos | 22 |
| 5.2. Parts i funcionament | 23 |
| 5.3. Tipus de túnels..... | 26 |
| 5.4. Interpretació de resultats..... | 28 |
| 5.5. Eines d'assaigs d'aerodinàmica..... | 29 |
| 5.6. Resum..... | 32 |
| 6. DINÀMICA DE FLUIDS COMPUTACIONAL | 33 |
| 6.1. Què és CFD | 33 |
| 6.2. Com funciona el CFD?..... | 34 |
| 6.3. Passos a seguir | 34 |
| 6.4. Resum..... | 38 |
| 7. EXPERIMENTACIÓ AMB EL TÚNEL DE VENT | 39 |
| 7.1. El túnel de vent | 39 |
| 7.1.1. Dades tècniques del túnel | 41 |
| 7.2. Instrumentació | 42 |
| 7.3. Geometries treballades..... | 43 |

| | | |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.4. | Factors a tenir en compte en l'assaig | 45 |
| 7.5. | Visualitzacions en el túnel de vent | 49 |
| 7.6. | Presa de mesures..... | 50 |
| 7.7. | Experiència | 51 |
| 7.8. | Anàlisi de resultats | 55 |
| 8. | VALORS EXPERIMENTALS BIBLIOGRÀFICS DE COEFICIENT DE RESISTÈNCIA A L'AVANÇ | 63 |
| 8.1. | Cilindre, esfera i el·lipsoide | 63 |
| 8.2. | Cos fusiforme | 65 |
| 8.3. | Altres fonts bibliogràfiques | 66 |
| 9. | SIMULACIÓ NUMÈRICA | 67 |
| 9.1. | Introducció del programari | 67 |
| 9.2. | Simulació del les maquetes | 68 |
| 9.2.1. | Geometria (Geometry) | 68 |
| 9.2.2. | Mallat (Mesh) | 70 |
| 9.2.3. | Configuració (Setup) | 79 |
| 9.2.4. | Solució (Solution) | 82 |
| 9.2.5. | Resultats (Results)..... | 83 |
| 10. | COMPARACIÓ DE VALORS AMB ELS BIBLIOGRÀFICS | 96 |
| 10.1. | Esfera..... | 96 |
| 10.2. | Cilindre amb incidència lateral | 97 |
| 10.3. | El·lipsoide..... | 98 |
| 10.4. | Cos fusiforme | 99 |
| 10.5. | Cilindre amb incidència frontal | 101 |
| 11. | PLANIFICACIÓ TEMPORAL I ESTUDI ECONÒMIC | 102 |
| 11.1. | Costos del projecte | 102 |
| 11.2. | Balanç de costos..... | 103 |
| 11.3. | Pressupost del projecte | 104 |
| 11.4. | Planificació temporal | 105 |
| 12. | IMPACTE AMBIENTAL | 106 |
| 12.1. | Fonts de contaminació per l'elaboració del projecte | 106 |
| 12.2. | Principals contaminants | 107 |
| 12.3. | Contaminació produïda..... | 107 |
| | CONCLUSIONS | 109 |
| | AGRAÏMENTS | 112 |
| | BIBLIOGRAFIA | 113 |

1. Prefaci

1.1. Origen i motivació del projecte

Un cop realitzades totes les assignatures obligatòries del grau en tecnologies industrials, i fent un balanç d'allò que s'ha trobat més interessant al llarg d'aquests anys, d'entre tots els camps que s'han tocat hi destaca, personalment, la mecànica de fluids. Lamentablement, durant el grau només s'estudia una assignatura d'aquest camp, i degut a l'interès en aquest van cursar-se les dos assignatures optatives relacionades amb la mecànica de fluids, entre elles la de dinàmica computacional de fluids. L'interès en realitzar aquest projecte va augmentar a l'haver tingut la oportunitat de treballar amb l'Ansys CFX durant aquesta optativa, ja que és una eina molt atractiva i de gran utilitat. Tot això i, juntament amb el fet d'haver d'utilitzar un túnel de vent per dur a terme aquest estudi, va acabar de decantar la balança cap a aquest camp de l'enginyeria.

1.2. Requeriments previs

Per a la compressió i seguiment d'aquest projecte, caldrà tenir una noció bàsica de la mecànica de fluids, especialment dels conceptes relacionats amb els tipus de flux i el nombre de Reynolds. Malgrat tot, es realitzarà una petita introducció més endavant d'aquests conceptes necessaris. A més a més, en la part que compren totes les simulacions numèriques juntament amb els seus respectius resultats i visualitzacions, és de gran ajuda haver manejat el programari amb el que s'ha treballat, l'Ansys Workbench.

2. Introducció

2.1. Objectius del projecte

Una de les aplicacions més interessants de la mecànica de fluids és la de millorar el rendiment aerodinàmic de tot tipus de cossos. A més, matant dos ocells d'un sol tret, això es pot fer mitjançant programes de simulació numèrica reduint així el nombre d'experiments en el túnel de vent i també el cost dels recursos utilitzats.

Així doncs, els principals objectius d'aquest treball seran:

- Dur a terme tant els anàlisis experimentals com els de la simulació numèrica i veure els avantatges i inconvenients tant d'un com l'altre.
- Refrescar i millorar els coneixements prèviament adquirits sobre les simulacions numèriques amb el programari Ansys CFX.
- Realitzar els experiments de la forma més acurada possible per tal que els valors dels llibres, els experimentals i els simulats siguin iguals.
- Saber explicar tots els errors i discrepàncies produïdes durant el transcurs del treball.
- Sense deixar de banda la passió i l'ambició personal, s'aprofitarà l'oportunitat per aprendre a treballar amb un túnel de vent.
- Per últim, beneficiar-se d'aquesta última tasca del grau universitari per millorar en la redacció i exposició de projectes per a la correcta elaboració d'aquests en el món laboral.

2.2. Abast del projecte

Aquest projecte es limita a comparar els valors dels coeficients de resistència existents en els llibres amb els d'una simulació numèrica realitzada per ordinador i amb l'assaig en un túnel de vent. Malgrat no incloure cap procés d'optimització geomètrica, si que s'analitzaran les discrepàncies obtingudes en la comparació. A més, en el projecte també s'explicarà quines són les geometries òptimes per aconseguir les condicions de flux que es vulguin obtenir.

3. La Mecànica de Fluids

3.1. Introducció i hipòtesis

La Mecànica de Fluids és la branca de la Mecànica de Medis Continus i, per tant, branca de la física, que estudia el moviment dels fluids (tant gasos com líquids) i de les forces que el provoquen. Un fluid es caracteritza principalment per no poder resistir un esforç tallant i, per tant, deformar-se contínuament mentre se li segueix aplicant (per petit que sigui).

La hipòtesis fonamental de la Mecànica de Fluids és la del medi continu. Aquesta hipòtesis considera que el fluid és continu al llarg de l'espai que ocupa, tot ignorant la seva estructura molecular. D'aquesta manera es pot considerar que les propietats del fluid (com la temperatura o la densitat) són funcions contínues.

Aquest treball es centrarà amb l'aire com a fluid, és a dir, un fluid gasós. Aquest estat de fluid té les característiques següents:

- Molècules molt separades
- No tenen volum definit
- Forces de cohesió negligibles
- No formen una superfície lliure.

A més, la Mecànica de Fluids, assumeix les hipòtesis de que es compleixen les equacions de la conservació de la massa i de la quantitat de moviment.

3.2. Lleis i equacions que intervenen

Aquesta branca es desenvolupa a partir de les **Lleis de Newton**. Juntament amb les **equacions de continuïtat, quantitat de moviment i energia** es poden obtenir models que descriuen el moviment dels fluids. Aquestes equacions es mostren tot seguit:

- Tot objecte es manté en el seu estat de repòs o moviment uniforme en línia recta, a menys que es vegi forçat a canviar aquest estat per mitjà de forces que actuïn sobre ell.
- La força que actua sobre un cos és igual al producte de la seva massa i l'acceleració.
- Per cada acció, existeix una reacció d'igual valor però de signe oposat.

Equació de continuïtat (forma integral):

$$\frac{dm}{dt} = 0$$

$$\frac{d}{dt} \left(\int_{V_c} \rho dV \right) + \int_{S_c} \rho (V \cdot n) dA = 0$$

Equació 3.2.1 Continuïtat (forma integral)

Equació de la quantitat de moviment (forma integral):

$$\sum \bar{F} = \frac{d\bar{P}}{dt} \Big|_{sys} = \frac{d(m\bar{V})}{dt} \Big|_{sys}$$

$$\sum F = \frac{d}{dt} \left(\int_{V_c} \rho V dV \right) + \int_{S_c} \rho V (V \cdot n) dA$$

Equació 3.2.2 Quantitat de moviment (forma integral)

On “n” fa referència al vector normal de la superfície de control tal i com s'expressa a la figura 3.2.1.

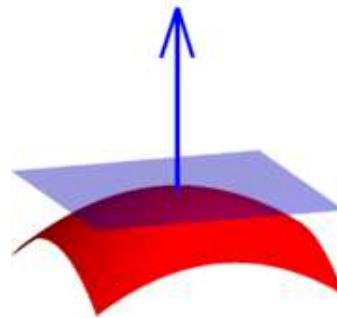


Figura 3.2.1 Vector normal d'una superfície [6]

Equació de l'energia:

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho g} = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + z_2 - z_1 + h_{f1-2} + h_s$$

(1) (2) (3) (4) (5)

Equació 3.2.3 Equació de l'energia

- (1) Variació de pressió de 1 a 2 en la direcció del flux.
- (2) Variació de pressió deguda a l'acceleració del fluid.
- (3) Variació de pressió deguda al canvi de cota.
- (4) Variació de pressió deguda a la fricció i a les singularitats (pèrdues lineals).
- (5) Variació de pressió deguda al treball mecànic (pèrdues singulars).

El terme de les pèrdues de càrrega singulars (secundàries) (h_s) i les pèrdues de càrrega lineals (primàries) (h_f) es calcula de la següent manera:

$$h_f^{sing} = K \frac{c^2}{2g}$$

Equació 3.2.4 Pèrdues singulars

$$h_f^{lin} = f \frac{L}{D} \frac{c^2}{2g} = \frac{8}{\pi^2} \frac{fL}{D^5 g} Q^2$$

Equació 3.2.5 Pèrdues lineals

On respectivament la velocitat i el cabal del flux són “c” i “Q”. La gravetat és “g”, “K” és la constant de la singularitat determinada de forma empírica per cada tipus de punt singular (vàlvules, colzes...), “L” i “D” són respectivament la longitud i el diàmetre de la canonada i “f” és el coeficient de fricció que és funció del nombre de Reynolds (es veurà en l'apartat de conceptes bàsics) i de la rugositat relativa.

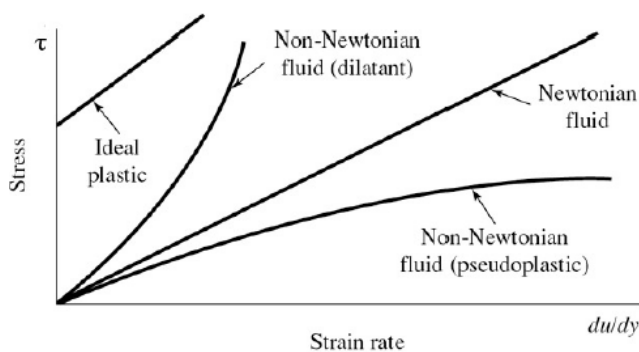
3.3. Conceptes bàsics

Abans de centrar-se en l'aerodinàmica, convé tenir clars alguns conceptes bàsics de la Mecànica de Fluids.

Viscositat del fluid

La viscositat dinàmica μ és una propietat fonamental d'un fluid. Aquesta és la mesura quantitativa de la resistència d'un fluid a fluir, i determina la velocitat de deformació del fluid quan se li aplica un esforç tallant.

Segons la relació entre la tensió aplicada i el gradient de velocitats del fluid, aquests es classifiquen en Newtonians (compleixen les lleis de Newton) o no Newtonians.



Gràfic 3.3.1 Esforç tallant en funció del gradient de velocitats [6]

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

Equació 3.3.1 Esforç tallant

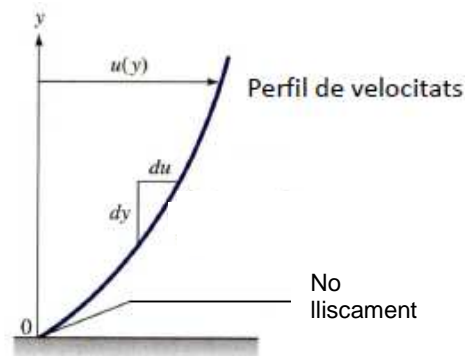
$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Equació 3.3.2 Viscositat cinemàtica

Tal i com es mostra a la figura, els fluids Newtonians tenen una relació Tensió-Gradient de velocitats lineal.

Descripció del fluid

Per estudiar el perfil de velocitats es té present la condició de no lliscament característica dels fluids viscosos. Aquesta condició implica que com la tensió a la paret és màxima, la velocitat és 0.



Gràfic 3.3.2 Perfil de velocitats [6]

Es defineix llavors, **flux estacionari** com la situació on les propietats no es modifiquen amb el temps però poden variar a mesura que la partícula avança al llarg de la seva trajectòria.

Per descriure un fluid, cal especificar els conceptes de línia de corrent i trajectòria.

La **línia de corrent** és la línia que en un instant donat és tangent al vector velocitat en tot punt i la **trajectòria** és el moviment o el camí que segueix la partícula de fluid.

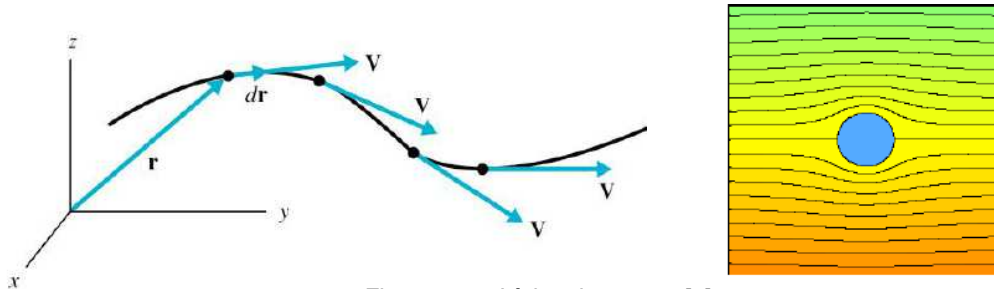


Figura 3.3.1 Línies de corrent [6]

Si els perfils de velocitat no varien en la direcció del flux és a dir, es produeixen lluny de les entrades o canvis de geometria, el flux s'anomena **flux desenvolupat**.

En cas que les propietats del flux romanguin constants al llarg de tota l'àrea considerada, es tracta d'un **flux uniforme**.

En algun cas, la viscositat d'un flux es pot negligir. En aquest cas es parlarà de fluxos no viscosos. En canvi, si les forces viscoses són importants, s'estarà davant d'un **flux viscos**.

Un efecte molt important en la Mecànica de Fluids i sobretot en l'aerodinàmica és la compressibilitat o no del fluid. Per a aquesta classificació es defineix el paràmetre adimensional anomenat **nombre de Mach (M)**, on "a" és la velocitat del so del fluid i "v" la velocitat:

$$M = \frac{v}{a}$$

M > 0.3: **flux compressible**

M < 0.3: **flux incompressible**

Equació 3.3.3 Nombre de Mach

El concepte de compressibilitat fa referència a canvis significatius en la densitat. Quan s'obté un Mach $M > 1$ el flux és **supersònic** i si el Mach $M < 1$ el flux és **subsònic**. Per últim, existeix una classificació de vital importància que es defineix mitjançant el paràmetre adimensional anomenat **nombre de Reynolds (Re)**, on "V" és la velocitat, "L" la longitud característica, "ρ" la densitat i "μ" la viscositat dinàmica ("ν" és la viscositat cinemàtica).

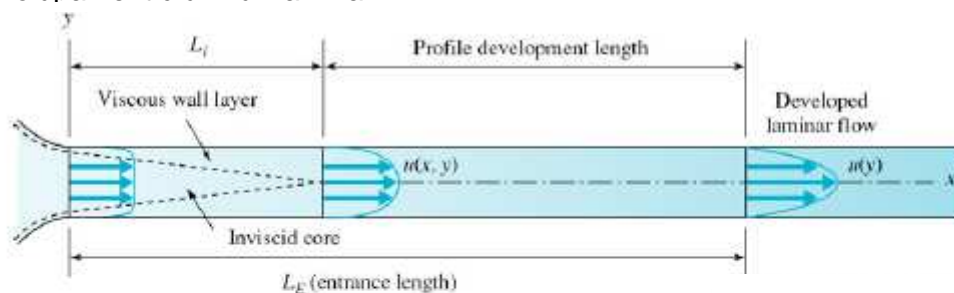
$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} = \frac{V \cdot L}{\nu}$$

Equació 3.3.4 Nombre de Reynolds

Aquest nombre determina el comportament de tot fluid newtonià.

- Re baixos: **Flux Laminar** ($Re < Re$ crític). Moviment lent i viscos, efectes d'inèrcia negligibles. Variacions suaus. No existeix una barreja significativa entre les partícules properes entre sí.
- Re elevats: **Flux Turbulent** ($Re > Re$ crític). Moviment amb fortes fluctuacions. El moviment del fluid varia irregularment, les propietats presenten variacions aleatòries amb el temps i l'espai (es descriuen mitjançant promigis estadístics).

Desenvolupament d'un flux laminar



Desenvolupament d'un flux turbulent

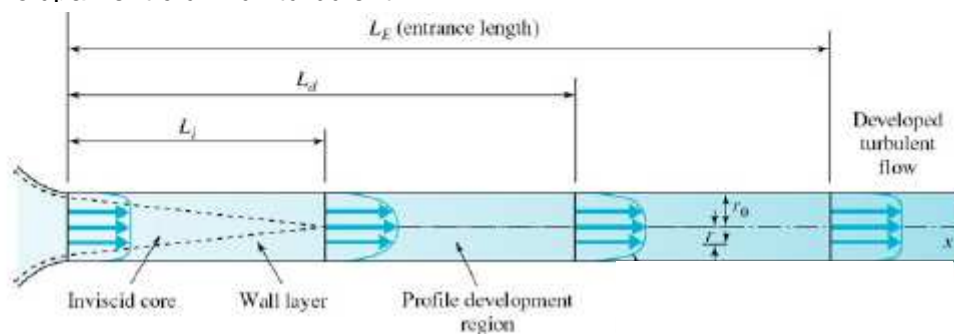


Figura 3.3.2 Flux Laminar i flux Turbulent [6]

En aquesta imatge es distingeixen els desenvolupaments dels fluxos laminar i turbulent. Com s'aprecia a la imatge, un cop el flux ja és desenvolupat, la forma del perfil de velocitats en el flux turbulent té una forma més quadrada mentre que en el laminar és més parabòlica.

Un cop vistos els tipus de classificacions per als fluxos es poden introduir les equacions fonamentals per resoldre qualsevol problema de Mecànica de Fluids. Aquestes equacions són l'equació de continuïtat (vista anteriorment) i l'equació de Navier-Stokes.

Equació de Navier-Stokes

Es tracta d'un conjunt d'equacions en derivades parcials no lineals que descriuen el moviment d'un fluid. Aquestes equacions en general, descriuen qualsevol fenomen en el que s'involucrin fluids newtonians. Aquestes equacions s'obtenen aplicant els principis de conservació de la mecànica i la termodinàmica a un volum de control de fluid. Aquestes equacions són les següents:

$$\begin{aligned}\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) &= \mu \left[\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x \\ \rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) &= \mu \left[\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y \\ \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) &= \mu \left[\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z\end{aligned}$$

Equació 3.3.5 Navier-Stokes

Com aquesta és l'expressió general, es poden anar simplificant termes segons el cas que s'estigui tractant. Per exemple, en el cas dels fluxos no viscosos, es podrien suprimir tots els termes on hi intervingui la viscositat dinàmica.

4. L'aerodinàmica

4.1. Introducció

Un cop introduïts els conceptes bàsics de la Mecànica de Fluids, ja es pot parlar sobre l'aerodinàmica.

L'aerodinàmica és la branca de la Mecànica de Fluids que estudia les accions que apareixen sobre els cossos sòlids quan existeix un moviment relatiu entre aquests i el fluid que els envolta.

Amb aquestes característiques de moviment es pot obtenir una funció potencial que al ser derivada s'obté la velocitat del fluid en cada punt, i posteriorment altres magnituds importants.

4.2. Quines són les forces més significatives?

Modelant el camp del fluid és possible calcular de manera aproximada les forces que actuen sobre el cos submergit. La relació entre aquestes forces i les velocitats ve donada pels coeficients de forma aerodinàmics.

Una tècnica usada per obtenir aquests paràmetres és l'anàlisi dimensional. És un mètode per reduir el nombre i la complexitat de les variables que intervenen en un fenomen físic. El seu ús comporta:

- L'estalvi de temps i diners.
- Una ajuda a la planificació d'experiments.
- Una llei de semblança que permet extrapolar els resultats obtinguts en un "model" a escala reduïda als del "prototip" real.

Tots els paràmetres adimensionals rellevants tenen els mateixos valors per al model i el prototipus. Per poder extrapolar els valors obtinguts d'un model a un prototip, els dos assaigs han de ser semblants és a dir, que es compleixin les semblances següents:

Semblança geomètrica: Totes les dimensions lineals del model estan relacionades amb les dimensions corresponents en el prototipus per un factor d'escala constant.

Semblança cinemàtica: Les velocitats en punts corresponents en el model i el prototipus tenen la mateixa direcció i tan sols difereixen per un factor d'escala constant (Implica la semblança geomètrica).

Semblança dinàmica: S'obté bàsicament si les forces en punts similars en el model i el prototipus difereixen per un factor d'escala constant. (Implica les semblances geomètrica i cinemàtica)

Els paràmetres adimensionals més rellevants en la Mecànica de Fluids són els que es mostren a la taula següent:

| | | | |
|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| NOMBRE DE REYNOLDS | $R_E = \rho UL/\mu$ | INÈRCIA/VISCOSITAT | SEMPRE |
| NOMBRE DE MACH | $MA = U/A$ | VELOCITAT FLUX/VELOCITAT SO | FLUX COMPRESSIBLE |
| NOMBRE DE FROUDE | $F_r = U^2/gL$ | INÈRCIA/GRAVETAT | FLUX AMB SUPERFÍCIE LLIURE |
| NOMBRE DE WEBER | $W_e = \rho U^2 L/\gamma$ | INÈRCIA/TENSIÓ SUPERFICIAL | FLUX AMB SUPERFÍCIE LLIURE |
| NOMBRE D'EULER (CAVITACIÓ) | $C_s = (p-p_v)/\rho U^2$ | PRESIÓ/INÈRCIA | CAVITACIÓ |
| NOMBRE DE STROUHAL | $St = \omega L/U$ | OSCILACIÓ/VELOCITAT MITJA | FLUX OSCIL·LATORI |
| RUGOSITAT RELATIVA | ϵ/L | RUGOSITAT/LONGITUT DEL COS | FLUX TURBULENT, PARET RUGOSA |

Taula 4.2.1 Paràmetres adimensionals [6]

Pel que fa a l'aerodinàmica, els coeficients més senzills són els que donen les forces de sustentació (Lift, L) i la resistència aerodinàmica (Drag, D). On V correspon a la velocitat i S_t a l'àrea transversal.

- Coeficient aerodinàmic de sustentació (Lift coef.)
$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 S_t}$$
- Coeficient aerodinàmic de resistència (Drag coef.)
$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 S_t}$$

Equació 4.2.1 Lift i Drag equation

Tot i això, degut a la complexitat dels fenòmens que hi intervenen i les equacions que descriuen els moviments, són de gran utilitat els assaigs pràctics (com ara en un túnel de vent) o les simulacions amb càlculs numèrics.

Les quatre forces que intervenen en un vehicle són el pes (weight), la sustentació (lift), la resistència a l'avanç (drag) i l'empenta (thrust). Aquestes forces fan que un objecte s'enlairi o caigui ràpid o lentament. Una petita modificació en el valor d'una d'aquestes forces pot canviar el moviment per complet.

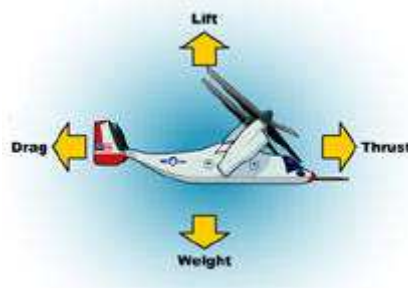


Figura 4.2.1 Representació de forces que intervenen en un vol [12]

Pes (weight)

Tot a la Terra té pes. Aquesta força prové de la gravetat que atrau els objectes cap al terra. Els vehicles aeris necessiten d'una força oposada al pes per poder volar.



Figura 4.2.2 Pes [12]

Sustentació (Lift) i Resistència (Drag)

La sustentació positiva és la força necessària que permet que els objectes s'elevin. En comparació amb el pes, la seva direcció s'hi oposa i el seu valor ha de ser major. En un avió, aquesta força prové de les ales.

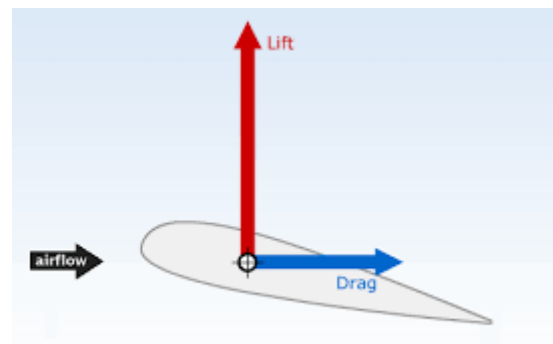


Figura 4.2.3 Sustentació (Lift) i Resistència (Drag) [12]

La resistència a l'avanç és la força que intenta aturar un cos i fa que es dificulti el moviment. Segons el tipus de fluid i la geometria de l'objecte, el valor de la resistència variarà. L'aire com a fluid i les superfícies circulars són les condicions que provoquen menys resistència. A major superfície de contacte, major força d'oposició.

Com es proporciona la sustentació?

La curvatura en la part superior de les ales d'un avió i la planitud per sota és el que els fa capaços de volar. Aquesta forma fa que l'aire flueixi més ràpidament per sobre que per sota, tot obtenint més pressió a la part inferior que a la superior. Així doncs, canviar la curvatura en la forma de les ales produeix una variació de pressió que comporta un canvi en les forces en sentit vertical. El mateix succeeix canviant la inclinació de les ales.

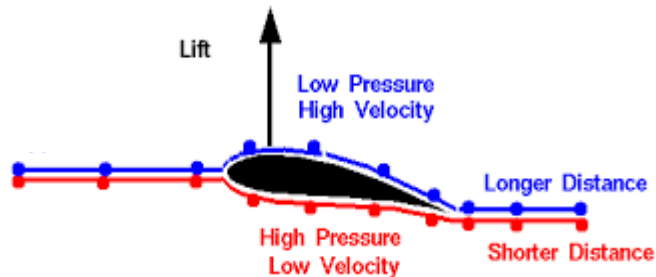


Figura 4.2.4 Zones d'altres i baixes pressions/velocitats [6]

Empenta

L'empenta és la força que s'oposa al fregament o resistència i és l'encarregada d'impulsar el cos cap endavant. En el cas d'un avió, per seguir-se movent cal tenir una empenta major que la resistència. Aquesta empenta pot ser causada per propulsors, o bé per motors en cas d'avions més grans.



Figura 4.2.5 Empenta [12]

4.3. Capa límit

Un concepte fonamental en l'aerodinàmica, és la capa límit. La capa límit es produeix en els fluxos entorn de cossos.

En la Mecànica de Fluids, la capa límit d'un fluid és la zona on el moviment d'aquest és pertorbat en presència d'un sòlid amb el que està en contacte. La capa límit s'entén com aquella zona on la velocitat del fluid respecte el sòlid en moviment varia des de 0 fins el 99% de la velocitat de la corrent no pertorbada. El gruix de la capa límit(δ) es calcula fins a aquell punt on s'assoleix el 99% de la velocitat inicial.

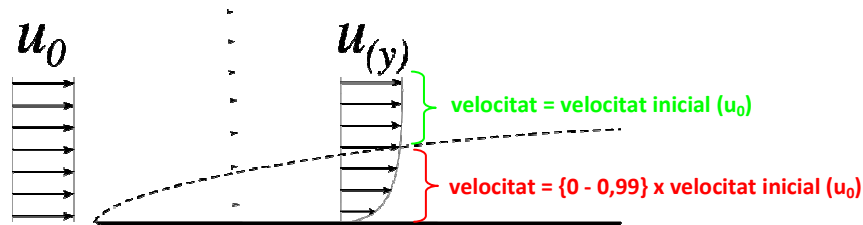


Figura 4.3.1 Fenòmen de la Capa Límit [6]

En aquesta capa, a prop de les superfícies del cos i en l'estela es produeixen efectes viscosos de cisalla i el fenomen de no lliscament. En canvi, els fluxos no viscosos es situen lluny del cos.

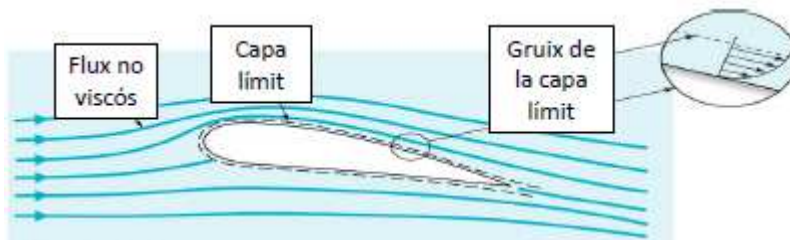


Figura 4.3.2 Capa Límit [6]

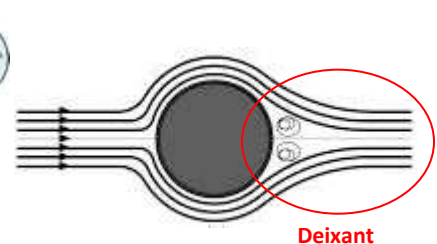


Figura 4.3.3 Deixant la capa límit [6]

L'estructura de la capa límit pot constar de tres zones diferenciades. Aquestes són la zona laminar, la de transició i la turbulenta.

En la imatge següent s'il·lustren aquestes tres zones en l'exemple d'una placa plana com a cos d'anàlisi, així com la diferència entre els perfils de velocitat.

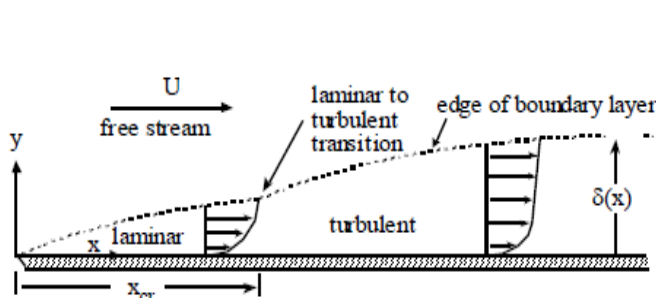


Figura 4.3.4 Zones de la Capa Límit [6]

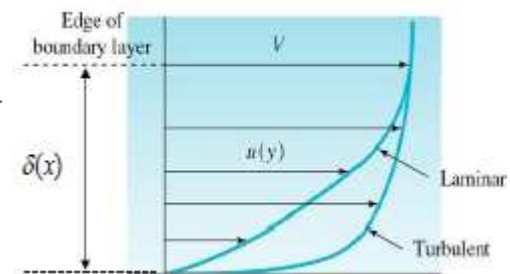


Figura 4.3.5 Perfils de velocitat Laminar i Turbulent [6]

Dins la capa límit, pot semblar que totes les regions es comporten igual però no és així. Segons la regió del perfil de velocitat que s'estudiï, els efectes de la tensió tangencial seran diferents:

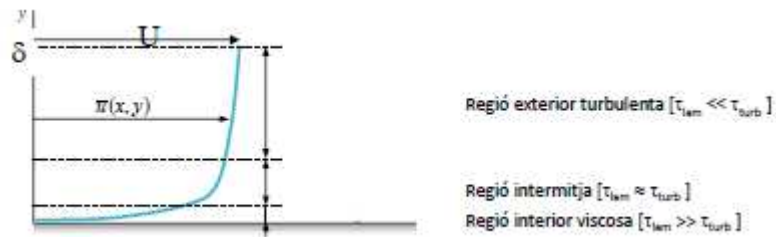


Figura 4.3.6 Regions Capa Límit [6]

4.4. L'efecte de la geometria i del nombre Re en la capa límit

Segons el tipus de geometria que s'estudiï, els efectes en la capa límit variaran. És a dir, la regió de la capa límit laminar o turbulent serà diferent si es treballa amb una esfera o amb un perfil aerodinàmic. A continuació es comentaran breument aquests efectes en diferents cossos geomètrics:

Esfera

En aquest cas, el cos a tractar disposa d'una geometria amb canvis. És per això que les línies de corrent no quedaran tant unides al cos un cop passada la zona conflictiva. Això és degut a l'augment de les forces d'inèrcia. Aquestes forces, al ser més grans que les viscoses, impedeixen que el flux segueixi circulant pel contorn del cos i fan que es separin d'ell.

Abans de tot cal definir els punts i zones importants en aquest tipus de cossos:

El **punt d'estancament** és el lloc on el flux passa de tenir una gran força d'inèrcia a tenir un fort augment de la força de pressió. És aquell punt o zona on el flux impacta contra el cos i s'obté la mínima velocitat (zero) i la màxima pressió.

El **punt de desprendiment** de la capa límit és aquella regió del cos on les línies de corrent del flux no poden seguir adherint-se al cos i es separen d'ell. El desprendiment és causat per un gradient de pressió desfavorable ($dp/dx > 0$). Aquest desprendiment provoca l'aparició d'un deixant que es caracteritza per haver-hi una recirculació del flux. Cal destacar que aquest punt no existeix si es treballa amb una placa plana ja que no hi ha una variació sobtada de la geometria del cos que produeixi un sobtat increment en l'inèrcia del flux.

El **punt de màxima velocitat** és aquell on la velocitat del fluid no s'incrementa més. Aquest punt correspon al punt de pressió mínima i, en cas que l'angle d'inclinació sigui nul, és el lloc més proper al punt d'estancament on l'alçada comença a disminuir.

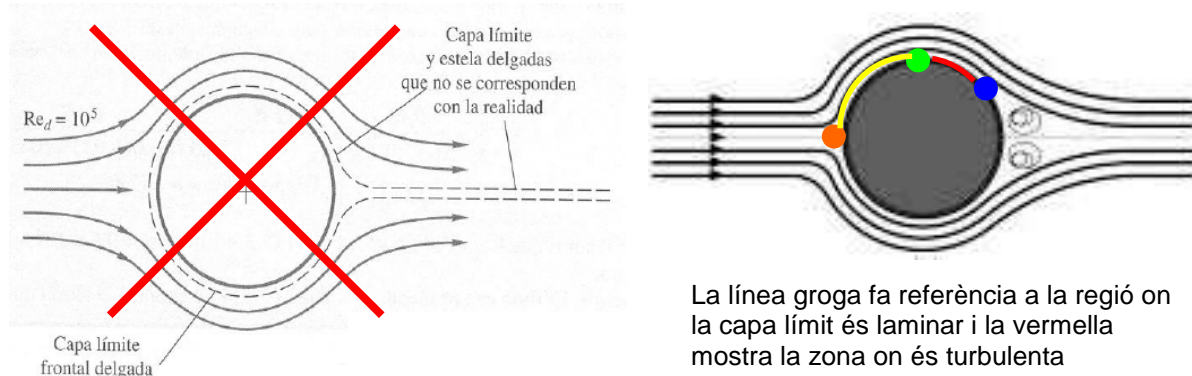


Figura 4.4.1 Capa Límit en una Esfera [6]

Perfil aerodinàmic

Aquest tipus de perfils s'anomenen aerodinàmics perquè la seva geometria està feta expressament per a optimitzar la circulació d'aire al voltant seu.

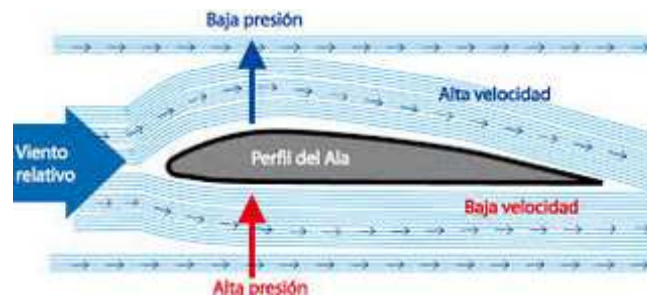


Figura 4.4.2 Zones d'altres i baixes presions/velocitats en un Perfil aerodinàmic [6]

Com es mostra a la figura de sobre, no hi ha presència de punt de desprendiment ni, per tant, d'un deixant degut a la forma més allargada i progressiva del perfil. Aquesta geometria, al ser recta per sota, no fa que el flux s'acceleri per aquesta part. En canvi, aquest fet es produeix a la part superior, on el flux s'accelera un cop passat el punt d'estancament. Això comporta que l'aire circuli amb una major velocitat per sobre que per sota, fet que comporta una major pressió a sota que a sobre. És per aquest motiu que el cos s'enlairaria.

5. El túnel de vent

5.1. Història i actuals usos

Un túnel de vent o túnel aerodinàmic és una eina dissenyada i fabricada per a l'estudi del comportament de l'aire quan es mou al voltant d'objectes sòlids. Aquests objectes sòlids poden ser de molt diversa naturalesa, des de vehicles de transport fins a edificis o estructures com ponts.

Els túnels de vent més primerencs van ser inventats a la fi del segle 19, en els primers dies de la investigació aeronàutica. El túnel de vent va ser concebut com una forma de revertir el paradigma habitual: en lloc de la situació de l'aire immòbil i un objecte que es mou a la velocitat a través d'ell, el mateix efecte s'obtingria si l'objecte roman quiet i l'aire es mogué. D'aquesta manera un observador estacionari podria estudiar l'objecte volador en l'acció, i podria mesurar les forces aerodinàmiques que hi intervindrien.

Més tard, l'estudi dels túnels de vent es va centrar en els efectes del vent sobre estructures o objectes necessaris fets per l'home. Va ser primordial quan els edificis es van fer prou alts com per presentar grans superfícies al vent i les forces resultants van haver de ser resistides per l'estructura interna de l'edifici. A més, els túnels de vent van tenir un gran desenvolupament per a la realització de diferents tipus d'ales en la primera i segona guerra mundial.



Figura 5.1.1 The Aeronautic Wind Tunnel, 1909 [14]

Encara més tard, les proves de túnel de vent van ser aplicades als automòbils, no tant per determinar les forces aerodinàmiques en si sinó per determinar formes de reduir la potència necessària per moure un vehicle per les carreteres a una velocitat determinada. En aquests estudis, la interacció entre la carretera i el vehicle juga un paper important, i aquesta interacció s'ha de tenir en compte a l'hora d'interpretar els resultats de la prova. En una situació real la calçada s'està movent respecte al vehicle, però l'aire és estacionari respecte a la calçada, però en el túnel de vent l'aire es mou

amb relació a la calçada mentre que la carretera és estacionària respecte al vehicle de prova.

Alguns túnels de vent per proves automobilístiques han incorporat cintes en moviment sota el vehicle, en un intent d'aproximar-se a la situació real, i dispositius molt similars s'utilitzen en les proves de túnel de vent de configuracions d'aeronaus d'enlairament i aterratge. Actualment, a la Fórmula 1 per exemple, la seva importància és elevadíssima, fins al punt que un petit error comès en les proves en el túnel de vent pot significar passar de guanyar carreres a quedar fora del podi.

La informació que els enginyers busquen obtenir al realitzar un assaig en un túnel de vent és:

- Coeficients aerodinàmics de resistència i sustentació
- Distribució de pressió en la superfície del cos
- Visualització del flux al llarg del cos per localitzar els punts de separació de flux mitjançant l'ús d'injectors de fum que permeten visualitzar les línies de corrent.

5.2. Parts i funcionament

Un túnel de vent semblant a el que s'utilitzarà consta de les següents parts:

- | | |
|------------------------------|------------------------------------|
| • Ventilador | • Cambra d'assaig |
| • Motor d'accionament | • Efusor (Contracció de la secció) |
| • Paletes | • Model |
| • Estabilitzadors de corrent | • Difusor |

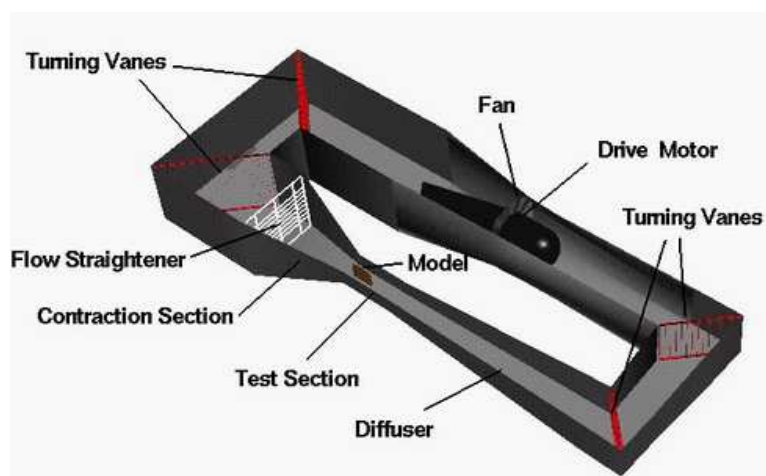


Figura 5.2.1 Parts d'un túnel de vent [10]

L'aire a l'interior del túnel està fet per moure's gràcies al **ventilador** (*fan*) situat en l'altre extrem del túnel. En la figura anterior l'aire es mou en sentit anti-horari al voltant del circuit. El ventilador gira gràcies a un gran **motor d'accionament** (*drive motor*), alimentat elèctricament.



Figura 5.2.2 Ventilador dels túnels de vent [15]

Deixant el ventilador, l'aire es fa girar a les cantonades girant unes **paletes** (*turning vanes*). Les paletes de gir són una cascada de perfils aerodinàmics que minimitzen la pèrdua de pressió total a les cantonades.



Figura 5.2.3 Paletes dels túnels de vent [15]

En sortir de la cantonada en la part superior esquerra de la figura 5.2.1, l'aire passa a través d'alguns **estabilitzadors de corrent** (*flow straighteners*) abans d'entrar a la **cambra d'assaig** (*test section*). El propòsit dels estabilitzadors de corrent és fer que el flux en la cambra d'assaig sigui el més uniforme possible. És un pas de conductes establert al llarg de l'eix del corrent principal d'aire per reduir al mínim els components de la velocitat laterals causats per turbulència moviment en el flux d'aire durant l'entrada. Les formes de secció transversal poden ser de cel·les hexagonals, quadrades i circulars.

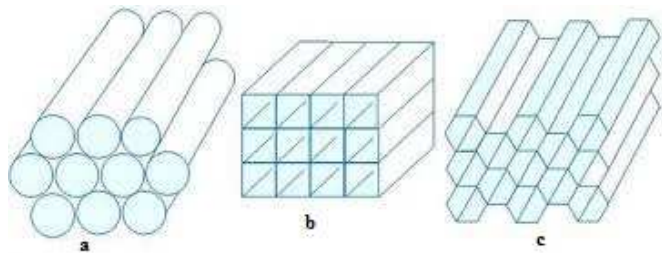
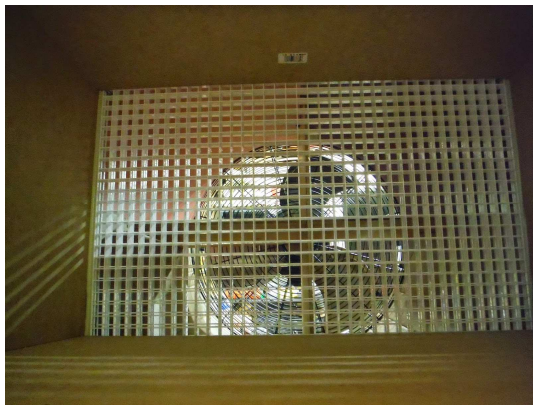


Figura 5.2.4 Estabilitzadors de corrent dels túnels de vent [16]

Abans d'entrar a la cambra d'assaig, però, el flux es fa passar per la **zona de contracció de la secció**, augmentant-ne així la seva velocitat. La cambra d'assaig és la part del túnel de vent en la qual es col·loca el **model** (*model*). Per al funcionament a baixa velocitat del túnel, la cambra d'assaig té l'àrea de secció transversal més petita possible i la velocitat més alta dins del túnel. En sortir de la test section, l'aire entra en el **difusor** (*diffuser*) en què s'expandeix i es frena abans de tornar al ventilador. El difusor és el pas gradualment expansió després de la secció de prova en el qual la velocitat del flux disminueix i la pressió augmenta. La recuperació de la pressió de l'energia cinètica redueix la potència necessària per impulsar el túnel.

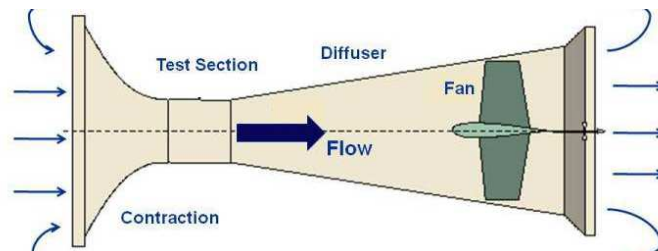


Figura 5.2.5 Efusor i difusor dels túnels de vent [10]

Un cop més, s'empra les paletes per minimitzar les pèrdues al túnel. Per aquest túnel de vent de circuit tancat, hi ha dues cantonades més amb paletes girant abans que l'aire és portat de nou al ventilador.

5.3. Tipus de túnels

Tots els túnels de vent són iguals? Per descomptat que no, i es poden diferenciar en diversos tipus segons uns criteris fonamentals:

- Per la circulació d'aire en el seu interior, poden ser de **cicle obert** o **tancat**. L'obert pren l'aire de l'atmosfera i el torna a la mateixa, el tancat fa servir un difusor perquè l'aire recuperi la seva energia inicial.
- Segons com sigui la cambra d'assaig, poden ser amb **cambra d'assaig oberta** o **tancada**
- Per la velocitat de flux serien **subsònics** (menor que la del so), **transsònics** (velocitat entre els 980 i 1230 km/h), **supersònics** (velocitat superior a la del so) i **hipersònics** (velocitat 5 o més vegades més gran que la del so).

El túnel de vent amb el qual es treballarà és el de cicle tancat amb la cambra d'assaig tancada.

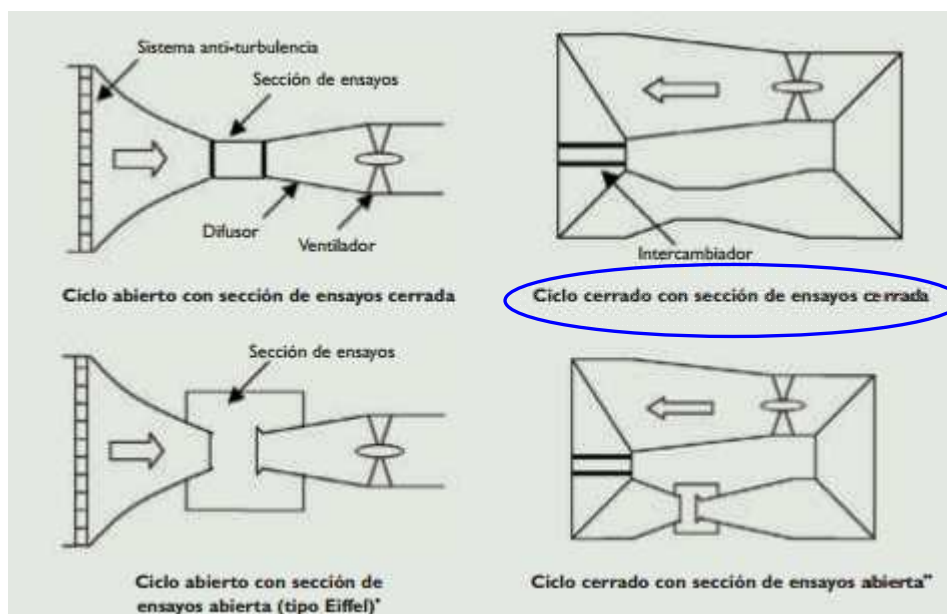


Figura 5.3.1 Tipus de túnels de vent [18]

En general, l'avantatge d'un túnel de cycle obert sol ser el seu menor cost de construcció i és especialment adequat quan s'ha d'evacuar el fum d'injectors de fum (empleats per visualitzar les línies de corrent) o els gasos de fuga del motor del vehicle assajat. Així mateix, i si les condicions ambientals són suficientment constants, la temperatura de l'aire en la secció d'assajos no anirà augmentant durant una prova llarga com en túnels de cycle tancat, en els quals aquest efecte ha de ser controlat mitjançant la introducció d'enormes bescanviadors de calor en el túnel (per compensar la calor generada per fricció de l'aire amb les parets i amb el model).

D'altra banda, els desavantatges d'un cycle obert són la possible influència de les condicions ambientals externes en el perfil de velocitats de la secció d'assajos (a causa de vents, etc), el soroll de la instal·lació i les baixes temperatures en la secció d'assajos si el túnel està situat en climes freds (això últim dificulta el treball dels operaris a l'interior del túnel). A més, s'ha de tenir en compte que el motor que mou el ventilador d'un túnel de cycle obert haurà de ser més potent que el del seu cycle tancat equivalent. Per tot l'anterior, la major part dels túnels de gran grandària són de cycle tancat. Per descomptat, el somni de qualsevol enginyer d'aerodinàmica és un túnel amb la major grandària possible per aproximar-se més a la realitat, però això està molt limitat pel pressupost del qual disposa cada equip.

Cal comentar també que l'àrea transversal de la secció d'assajos d'un túnel de vent és la menor de tot el conjunt, per la qual cosa la pressió serà mínima i la velocitat màxima (equació de Bernoulli). En la resta del túnel les condicions de velocitat i pressió seran unes altres, d'acord amb la citada equació de Bernoulli. Això es té en compte a l'hora de reforçar l'estructura del túnel en unes zones o unes altres, depenent dels valors de pressió a cada àrea.

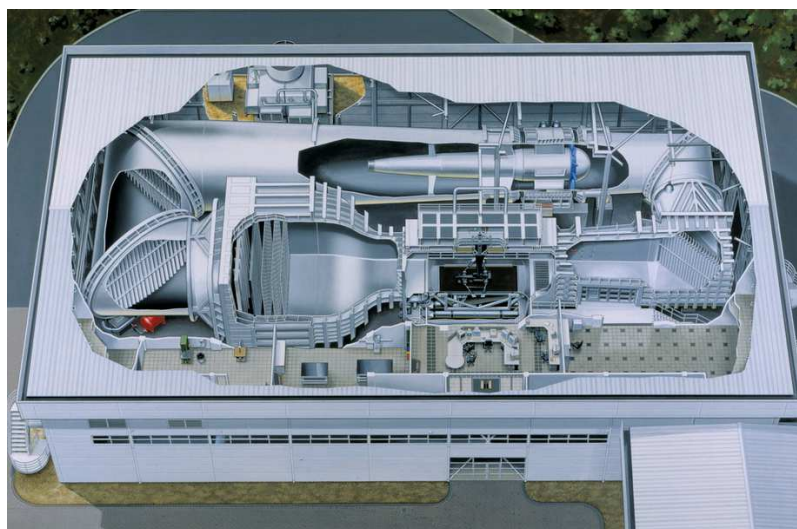


Figura 5.3.2 Túnel de vent de l'escuderia Ferrari [17]

5.4. Interpretació de resultats

Un cop obtinguts els resultats (per mitjà de supercomputadors), es comparen amb els resultats teòrics ja que es treballa amb models a escala la majoria de vegades. Com es validen o quins criteris es segueixen? Doncs es fa servir com a criteri fonamental, el nombre de Reynolds.

El nombre de Reynolds (Re), com s'ha comentat amb anterioritat, és un nombre adimensional que és usat en Mecànica de Fluids per caracteritzar el moviment d'un fluid qualsevol. Aquest paràmetre és funció de la densitat del fluid, la velocitat, la dimensió típica del fluid i la viscositat, sent la dimensió típica el diàmetre del conducte que travessa o la longitud de fluid.

Com influeix el Re en el càlcul? Doncs en l'aeronàutica hi ha un concepte que és el de la capa límit, que és la zona on el moviment de l'aire és pertorbat per la presència d'un sòlid en moviment. A la superfície d'aquest sòlid es forma aquesta capa límit que pot fluir en règim laminar o turbulent. La diferència fonamental entre el règim laminar i el turbulent roman en el fet que en el primer el flux és estable i forma làmines primes i el seu moviment és predictable. En règim turbulent el moviment és tridimensional, caòtic i impredecible.

Però aquí no acaben els problemes de càlcul, ja que al treballar amb objectes en un túnel de vent apareix el problema de la mida moltes vegades. En estructures seria impossible fer-ho a escala 1: 1, i en aeronàutica tampoc és possible moltes vegades a causa també de la mida de l'objecte d'estudi. En la Fórmula 1 per exemple, la mida no seria tant problemàtica, però treballar a escales de reducció del 50% o 60% fa que sigui menys costós, a més que les dades són extrapolables. A causa d'aquestes dificultats econòmiques i d'espai, la modelització és exigible per treballar en un túnel de vent i és aquí quan apareix la teoria de les semblances.

La teoria de les semblances s'empra per treballar amb models a escala i ajuda a que el comportament del model sigui el més semblant possible a la realitat. La teoria exigeix que entre el model i l'objecte real existeixin les tres semblances que s'han comentat amb anterioritat (geomètrica, cinemàtica i dinàmica).

5.5. Eines d'assaigs d'aerodinàmica

Per assajar i optimitzar l'aerodinàmica d'un vehicle o cos existeixen tres mètodes fonamentalment: proves experimentals, ocupació d'un túnel de vent i mètodes computacionals.

Cadascun dels tres mètodes comentats per obtenir aquestes dades sobre l'aerodinàmica del vehicle té avantatges i desavantatges i, per això, la solució adoptada pels equips sol ser una combinació de diverses d'aquestes eines.

Per descomptat, a part de consideracions tècniques, també es té en compte per a l'elecció d'un mètode o un altre el cost econòmic, en alguns casos molt elevat, d'algunes d'aquestes opcions. Per exemple, els assajos amb el vehicle real en un circuit introdueixen problemes, principalment per la falta de repetibilitat de les condicions ambientals, de conducció del pilot, de la pista, etc. A més, altres aspectes com la vibració de la suspensió dificulten la mesura dels coeficients aerodinàmics i de la seva distribució en l'eix davanter.

Finalment, per assajar en un circuit s'ha de disposar del vehicle ja construït, la qual cosa invalida aquesta eina per a les primeres fases del disseny aerodinàmic. Si s'emptra aquesta opció, qualsevol modificació de l'aerodinàmica s'ha de fabricar a grandària real per incorporar-la al cotxe i assajar-la en la pista.

L'ús de tècniques computacionals per al disseny i assaig de l'aerodinàmica de cotxes de competició és relativament recent i, encara que la seva evolució és molt prometedora, en l'actualitat exigeix una gran especialització en el personal que la utilitza, ja que les simplifications que incorporen els models d'ordinador fan necessari un elevat coneixement d'aquestes tècniques per a la correcta interpretació dels resultats.

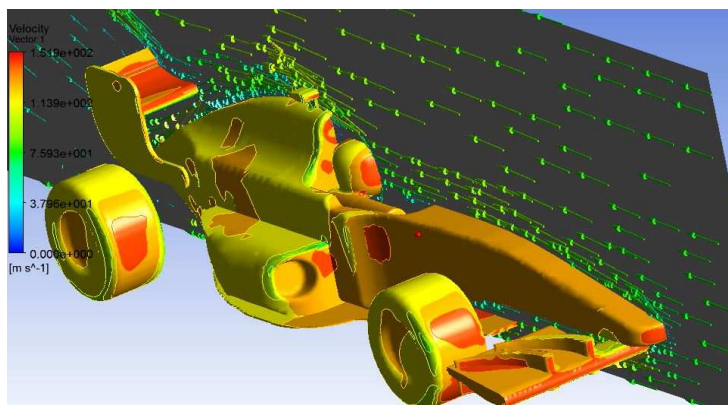


Figura 5.5.1 Tècniques Computacionals [8]

Això és a causa de la immensa complexitat de les equacions que regeixen la Mecànica de Fluids, la qual cosa obliga a l'aerodinàmica a ser una ciència predominantment empírica. No obstant això, si es realitzen comprovacions de la correlació dels assajos per ordinador amb els assajos sobre el cotxe real i s'adopten les correccions necessàries en els models per millorar aquesta correlació, les tècniques computacionals es converteixen en un complement de gran utilitat, ja que permeten assajar multitud de modificacions aerodinàmiques sense necessitat de fabricar-les i assajar-les en el túnel o en un circuit.

En Fórmula 1, per exemple es poden assajar en el túnel de l'ordre de 14.000 modificacions de l'aerodinàmica a l'any, per la qual cosa la principal utilitat dels models d'ordinador és simular un gran nombre de dissenys i seleccionar els més prometedors, que seran els únics assajats en el túnel. De moment els models per ordinador no són, per tant, capaços de substituir als assajos reals.

L'objecte d'aquest treball és estudiar el túnel de vent com a eina per al disseny aerodinàmic. Utilitzar un túnel soluciona pràcticament tots els problemes de repetibilitat que apareixen en els assajos reals, ja que es tracta d'un entorn molt controlat. No obstant això, el túnel presenta l'inconvenient de l'elevat cost d'instal·lació, especialment per a l'assaig de cossos de grandària real. A pesar que reduir la grandària del túnel suposa un estalvi per als equips, no s'ha d'oblidar que en túnels menors les condicions de flux simulades no són tan realistes com en túnels de major grandària per a un model de les mateixes dimensions, ja que l'efecte de les parets introdueix errors en el flux que no apareixen en el circuit. És a dir, el flux que s'està simulant en aquests casos no és el que el cotxe es troba en la realitat.

D'altra banda, existeixen els problemes derivats de l'anàlisi dimensional. Aquesta tècnica estudia les condicions que s'han de complir perquè els resultats obtinguts en l'assaig amb un prototip es puguin determinar a partir dels que s'obtenen amb un model a escala d'aquest prototip. El coneixement d'aquestes condicions, que essencialment exigeixen que una sèrie de nombres adimensionals coincideixin en els assajos realitzats amb prototip i model, permet realitzar assajos sobre un model de grandària menor que el prototip i determinar els resultats que s'haurien obtingut amb el prototip.

En el cas concret dels assajos de l'aerodinàmica en un túnel de vent, el principal problema radica en la dificultat que el nombre de Reynolds de l'assaig amb el model coincideixi amb el de l'assaig amb el prototip. L'objectiu inicial és reduir tant la grandària del model com la velocitat de l'aire (relacionada amb la potència del ventilador del túnel) perquè els assajos siguin menys costosos i més ràpids. Si, per exemple, es redueix la grandària del prototip a la meitat, la longitud característica del Reynolds es redueix a la meitat i caldrà de duplicar la velocitat de l'aire perquè el nombre de Reynolds no canviï.



Figura 5.5.2 Assajos a escala [13]

No obstant això, l'habitual és que no s'augmenti tant la velocitat de l'aire per la gran potència que necessitaria el ventilador. La conseqüència és que el Reynolds canvia i això pot fer que els resultats obtinguts en el túnel no siguin representatius. Això és especialment important si es realitzen assajos amb models molt petits (escala 1:5, per exemple), perquè en aquests casos el flux de l'assaig amb el model pot ser laminar quan en la realitat hauria de ser turbulent. Per això, l'ús del túnel de vent pot conduir a resultats que no sempre són traslladables directament al cos real.

5.6. Resum

En primer lloc, cal destacar que, per a una certa inversió econòmica, l'aerodinàmica és, en general, la forma més rendible d'obtenir millores en els temps d'un cos.

Avui dia, el túnel de vent és l'eina fonamental per a l'assaig de l'aerodinàmica en la cos. A pesar que els problemes descrits introdueixen errors en les mesures, no sol ser necessari, per exemple, mesurar un coeficient Lift amb més de dos decimals. És més important comptar amb una instal·lació que permeti entendre on radiquen els problemes del disseny aerodinàmic i que ofereixi resultats relatius entre diferents configuracions, que obtenir resultats absoluts molt precisos. Finalment, cal tenir en compte que un disseny optimitzat en un túnel de vent amb un model a escala serà bastant conservador, la qual cosa significa que serà possible obtenir encara millors resultats en el cos real.

6. Dinàmica de fluids computacional

La dinàmica de fluids computacional (CFD) és una de les branques de la Mecànica de Fluids que utilitza mètodes numèrics i algorismes per resoldre i analitzar problemes relacionats amb el flux dels fluids. Els ordinadors són utilitzats per realitzar milions de càlculs requerits per simular la interacció dels líquids i els gasos amb superfícies complexes projectades per l'enginyeria. Tot i treballar amb equacions simplificades i superordinadors d'alt rendiment, només es poden aconseguir resultats aproximats en molts casos. La contínua recerca, no obstant això, permet la incorporació de programari que augmenta la velocitat de càlcul i disminueix també el marge d'error. Això, al mateix temps, permet analitzar situacions cada vegada més complexes com els fluxos turbulents. La verificació de les dades obtingudes per CFD sol ser realitzada en túnels de vent o altres models físics a escala.

El mètode consisteix en discretitzar una regió de l'espai creant el que es coneix com una malla espacial, dividint una regió de l'espai en petits volums de control. Després es resol en cadascun d'ells les equacions de conservació discretitzades, de manera que en realitat es resol una matriu algebraica en cada cel·la de forma iterativa fins que el residu és suficientment petit.

6.1. Què és CFD

Computational Fluid Dynamics (CFD) és la ciència de la predicció de fluxos de fluids, transferència de calor i massa, reaccions químiques, i fenòmens relacionats.

Les equacions usades asseguren la conservació de la massa, l'energia, etc.

CFD s'utilitza en totes les etapes del procés de disseny:

- Els estudis conceptuals de nous dissenys
- El desenvolupament detallat d'un producte
- Resolució de problemes
- Redisseny

L'anàlisi CFD complementa les proves i l'experimentació mitjançant la reducció d'esforç total i cost requerit per a l'adquisició de l'experimentació i de dades.

6.2. Com funciona el CFD?

El solucionador CFD es basa en el mètode de volum finit:

- El domini es discretitza en un conjunt de volums de control.
- Les equacions de massa , quantitat de moviment, energia, etc. es resolen en aquest conjunt de volum de control.
- Les equacions diferencials parcials es discretitzen en un sistema d'equacions algebraiques.
- Totes les equacions algebraiques es resolen numèricament per representar el camp solució.

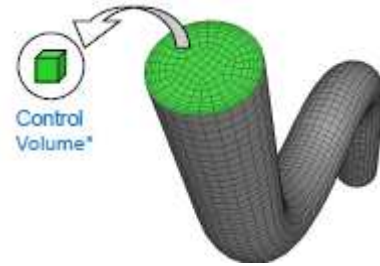


Figura 6.2.1 Volum de control [8]

6.3. Passos a seguir

En tota simulació CFD els passos a seguir i les preguntes a fer-se són les següents:

Pas 1 - Definir els objectius del model

- Quins resultats s'estan buscant (per exemple, gradients de velocitat o cabal màssic) i com es poden utilitzar?
- Quines són les opcions de modelatge?
 - Quins models de la física hauran de ser inclosos en l'anàlisi?
 - Quins supòsits per simplificar (com ara la simetria) es poden fer?
- Quin grau de precisió es requereix?
- Amb quina rapidesa es necessiten els resultats?
- CFD una eina adequada?

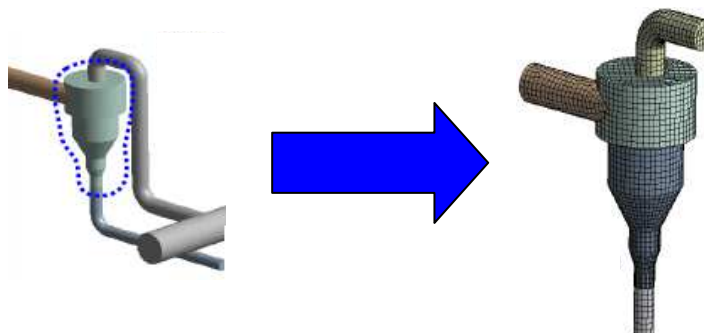


Figura 6.3.1 Definició del model [8]

Pas 2 - Identificar el domini del Model

- Com s'aïllarà una peça del sistema físic complet?
- On començarà i acabarà el domini computacional?
- Hi ha condicions de contorn en aquestes localitzacions?
- Es pot simplificar o aproximar el problema com un 2D o un problema axisimètric?

Pas 3 - Crear un model sòlid

- Com obtenir un model de la regió de fluid?
 - Fent ús de models CAD existents?
 - Crear-lo des de zero?
- Es pot simplificar la geometria?
 - Treure característiques innecessàries que complicarien mallat (com per exemple cargols).
 - Fer ús de la simetria o la periodicitat si tant la solució i les condicions de contorn són simètriques.
- És necessari dividir el model per què les condicions de contorn o domini es puguin crear?

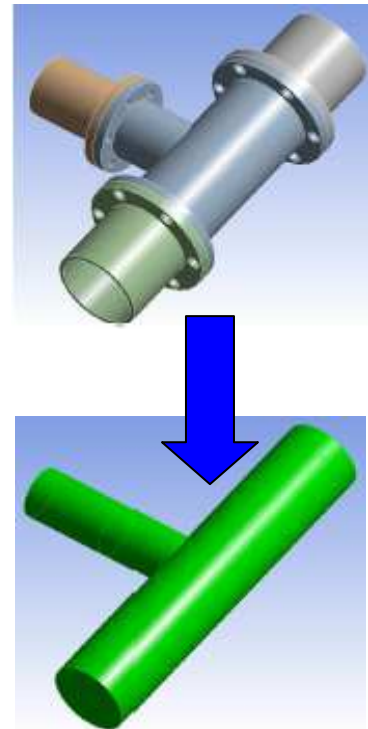


Figura 6.3.2 Simplificació [8]

Pas 4 - Disseny i Creació de la malla

- Quin grau de resolució de la malla es requereix en cada regió del domini?
- La malla ha de resoldre característiques geomètriques d'interès i capturar gradients com per exemple el de velocitat, pressió o de temperatura.
- Quin tipus de malla és la més apropiada?
 - Com de complexa és la geometria?
 - És més adequada una malla quadrada / hexagonal o triangular / tetragonal?
- Es tenen els recursos informàtics suficients?



Figura 6.3.3 Mallat [8]

Pas 5 - Preparar el Solver

Per a cada problema donat caldrà:

- Definir les propietats del material
 - Fluids
 - Sòlid
 - Barreja
- Seleccionar els models físics apropiats
 - Turbulència , combustió , multifase , etc.
- Proporcionar els valors inicials o d'una solució anterior
- Establir controls solucionadors
- Establir monitors de convergència

Pas 6 - Obtenir la Solució

- Les equacions de conservació discretitzades es resolen iterativament fins a la convergència
 - La convergència s'assoleix quan els canvis en les variables de la solució d'una iteració a la següent són insignificants.
- Els residus proporcionen un mecanisme per ajudar a monitoritzar aquesta tendència. (Els residus ajuden a monitoritzar quan s'arriba a la convergència. Són la diferència entre dues iteracions).
- Les variables d'interès han d'arribar a valors constants.
- La precisió d'una solució convergent depèn de:
 - Adequació i precisió dels models físics
 - Resolució de la malla
 - Errors numèrics

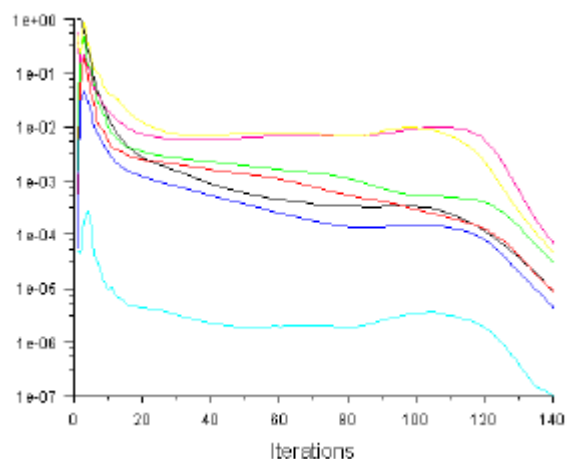


Figura 6.3.4 Arribada a la convergència [8]

Pas 7 - Examinar els resultats

- Examinar els resultats per revisar la solució i extreure dades útils
- Les eines de visualització es poden utilitzar per respondre a preguntes com:
 - Quin és el patró de flux en general?
 - Hi ha separació?
- Les eines d'informes numèrics es poden utilitzar per calcular els resultats quantitatius com ara:
 - Forces i moments
 - Els coeficients de transferència de calor mitjana
 - A més de la realització de gràfics a la regió desitjada

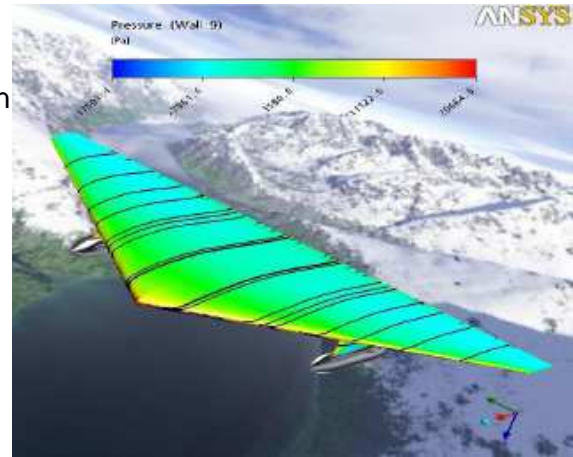


Figura 6.3.5 Visualització de Resultats(I) [8]

Pas 8 - Considerar revisions en els models

- Són adequats els models físics?
 - És turbulent el flux? És no permanent?
 - Hi ha efectes de compressibilitat o efectes 3D?
- Són correctes les condicions de frontera?
- És la malla l'adequada?
 - Es pot refinar per millorar els resultats?
 - Canvia la solució de forma significativa amb una malla refinada, o és la solució independent d'aquesta?

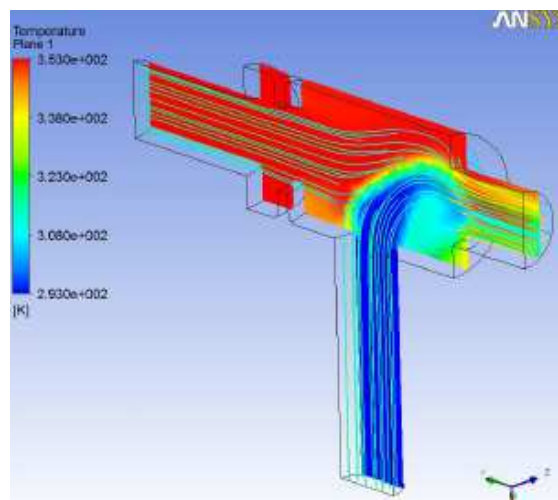


Figura 6.3.6 Visualització de Resultats(II) [8]

6.4. Resum

De tota aquesta explicació sobre la dinàmica de fluids computacional, es pot extreure que totes les simulacions CFD s'aborden mitjançant els passos que s'acaben de descriure. A més, cal pensar prèviament en els objectius de la simulació abans de la creació de la geometria i de la malla.

A part d'això, cal assegurar que el programa de solució està usant els models físics adequats i que la simulació és totalment convergent. Un cop la solució convergeix, cal examinar acuradament els resultats ja que és possible que s'hagi de tornar a treballar alguns dels passos anteriors per millorar la predicció del flux.

CFD dona una idea dels patrons de flux que són difícils, costosos o impossibles d'estudiar amb l'ús de tècniques tradicionals (experimentals). A continuació es mostra una classificació d'avantatges i inconvenients del mètode experimental i de la simulació:

| Experiments | Simulacions |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Descripció quantitativa dels fenòmens de flux prenent mesures | Predicció quantitativa dels fenòmens de flux utilitzant el programari CFD |
| <ul style="list-style-type: none"> • en un nombre limitat de punts i instants de temps • per a un model a escala de laboratori • per a una gamma limitada dels problemes i condicions d'operació • possibilitat d'errors de mesura • més car • més lent • seqüencials i per un únic propòsit | <ul style="list-style-type: none"> • amb alta resolució espacial i temporal • per al domini de flux real • per virtualment tots els problemes i condicions • possibilitat d'errors en la modelització, discretització, iteració, ... • més barat • més ràpid • paral·lel i per múltiples propòsits |

7. Experimentació amb el túnel de vent

7.1. El túnel de vent

Per dur a terme la part experimental d'aquest treball, s'usarà com a eina fonamental el túnel de vent. Tal i com s'ha explicat prèviament, hi ha principalment quatre tipus de túnels (cicle i cambra oberta o tancada).

El túnel amb el que s'ha treballat és el del Departament de Mecànica de Fluids de l'ETSEIB. El túnel correspon a un túnel subsònic (de baixa velocitat) amb una velocitat màxima de 60m/s (216 km/h) de cicle tancat i cambra d'assaig tancada. L'aire es tractarà com un fluid incompressible a $M < 0,3$.

Aquest és un túnel de construcció metàl·lica tubular amb una cambra d'assaig oval de metacrilat de dimensions 0,69 x 0,47 x 1,1 metres.

El túnel presenta diferents zones amb malles tranquil·litzades, per trencar remolins, i colzes directrius, un efusor amb angle de contracció 16° i amb una relació de contracció 1/5 i longitud 1,625 metres, i un difusor amb angle d'expansió de 6° i longitud 4,5 metres.

El vent es genera mitjançant un ventilador oleohidràulic amb àleps directrius i accionat per una bomba oleohidràulica que permet la regulació de la velocitat de gir del ventilador. Aquesta bomba és accionada per un motor elèctric de 25 CV.

A continuació es mostren les vistes acotades del túnel juntament amb algunes fotografies d'aquest.



Figura 7.1.1 Túnel de Vent de l'ETSEIB

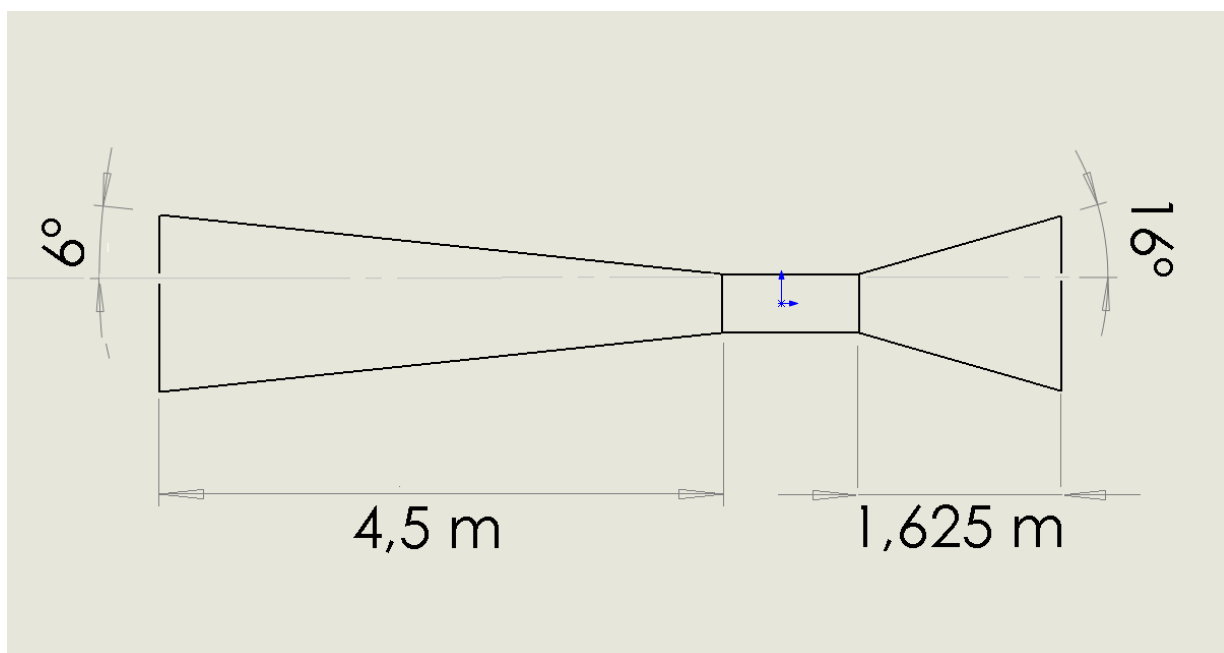


Figura 7.1.2 Cotes de l'efusor i el difusor

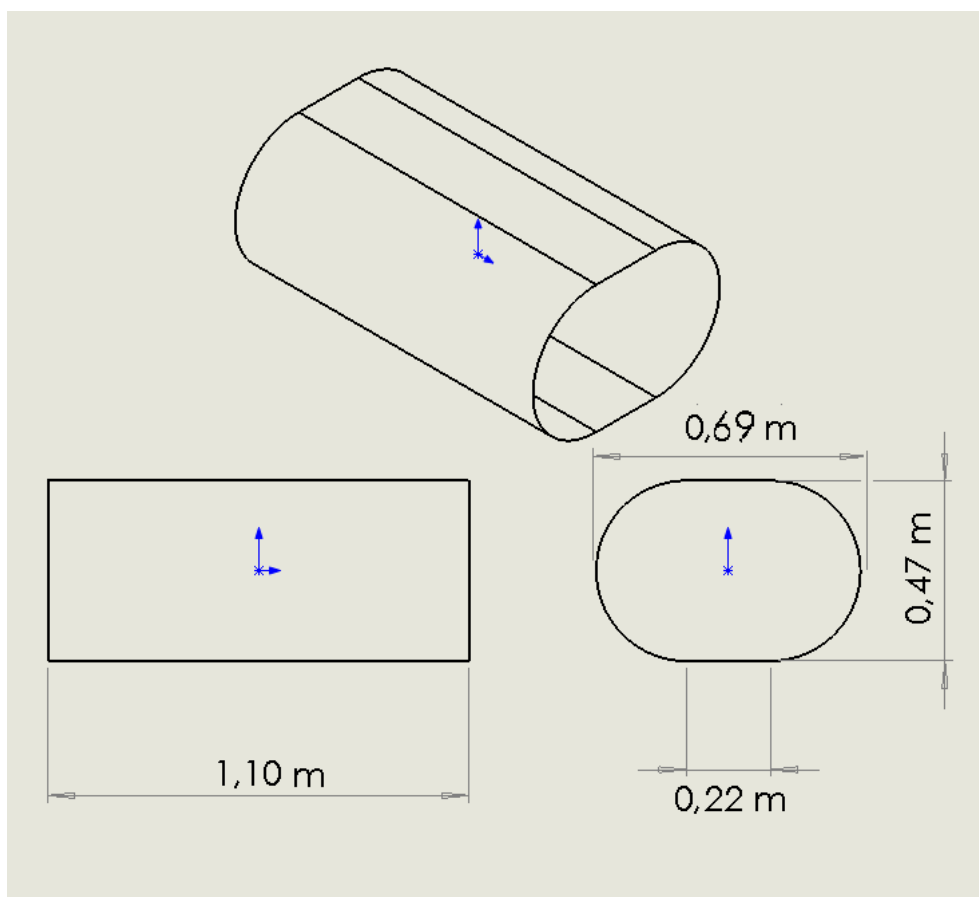


Figura 7.1.3 Cotes de la cambra d'assaig

7.1.1. Dades tècniques del túnel

Tot seguit s'especifiquen les característiques tècniques del túnel de vent tractat:

VENTILADOR:

10 Pales, diàmetre 1100/460.
Secció útil 0,78 m²
8 àleps directrius

MOTOR HIDRÀULIC:

MAC 03321N00 V280
(34,8 cm³/volta)

DENISON

60,9 l/min a 175 bar girant a
1450 rpm
62,2 l/min a 140 bar girant a
1520 rpm
Màxima pressió a catàleg 175
bar

BOMBA HIDRÀULICA:

TIC 01421R02V16B
girant a 1500 rpm

DENISON

60,9 l/min a 175 bar girant a
28,1 CV

62,2 l/min a 140 bar girant a
22,5 CV

Màxima pressió a catàleg 175
bar

MOTOR ELÈCTRIC:

25 CV a 1500 rpm

SECCIÓ NOMINAL:

0,5 m², interna lliure 0,25 m²

**VELOCITAT MÀXIMA
GARANTIDA A LA CAMBRA
D'ASSAIG:**

60 m/s

VELOCITAT MÍNIMA:

2 m/s

**VELOCITAT MITJANA A
TRAVÉS DEL VENTILADOR A
CABAL MÀXIM:**

38,5 m/s

**CAPACITAT NOMINAL EL
DISTRIBUÏDOR PRINCIPAL:**

Tipus DI D12 3310105037002
Màxima pressió 210 bar

CABAL MÀXIM D'AIRE:

30 m/s

**CAPACITAT NOMINAL DEL
REGULADOR DE CABAL:**

53 l/min
Tipus FC 0632102
Màxima pressió 210 bar

**ENERGIA CINÈTICA
CORRESPONENT:**

$V^2/2g=76$ m

7.2. Instrumentació

Per a la realització de l'assaig, el túnel de vent conta amb un mesurador de força sobre el cos exposat en la direcció X del vent. Aquest donava els valors en kilograms de força.



Figura 7.2.1 Mesurador de força

A més, les mesures de la velocitat es prenen amb una sonda de Prandtl.



Figura 7.2.2 Sonda de Prandtl

La sonda de Prandtl mesura la diferència entre la pressió total (dinàmica + estàtica) i la pressió estàtica en un punt d'un corrent fluid. Dona la pressió dinàmica a partir de la qual, es pot calcular la velocitat del fluid mitjançant:

$$v = C \sqrt{2gh \left(\frac{\rho_m}{\rho} - 1 \right)}$$

Equació 7.2.1 Velocitat del fluid al usar la sonda de Prandtl

On:

- v = velocitat del fluid
- C = coeficient de calibratge de la sonda
- h = altura del manòmetre
- ρ_m = densitat del fluid del manòmetre
- ρ = densitat del fluid d'estudi

La sonda de Prandtl pot semblar un aparell senzill, però ofereix una gran simplicitat i una elevada fiabilitat de resultats.

7.3. Geometries treballades

Per dur a terme el càlcul dels coeficients de resistència, s'han tractat quatre geometries diferents. Aquestes són una esfera, una el·lipsoide, un cilindre i un cos fusiforme. Les corresponents mesures s'especifiquen tot seguit juntament amb unes fotografies de mostra:

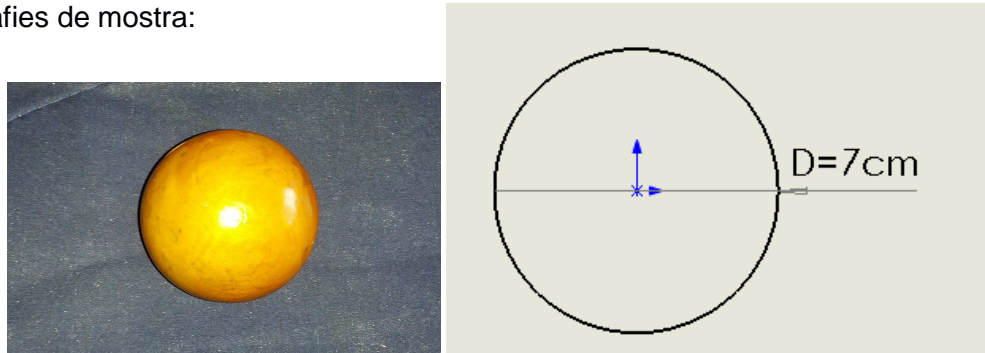


Figura 7.3.1 Esfera usada

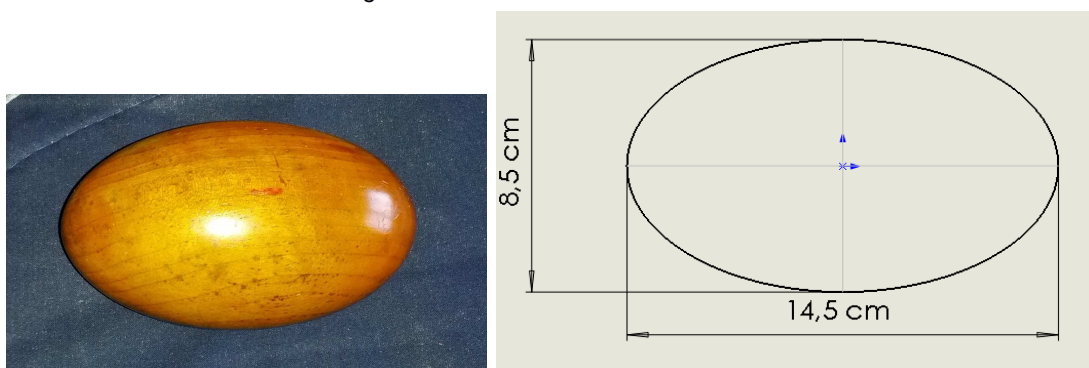


Figura 7.3.2 El·lipsoide usada

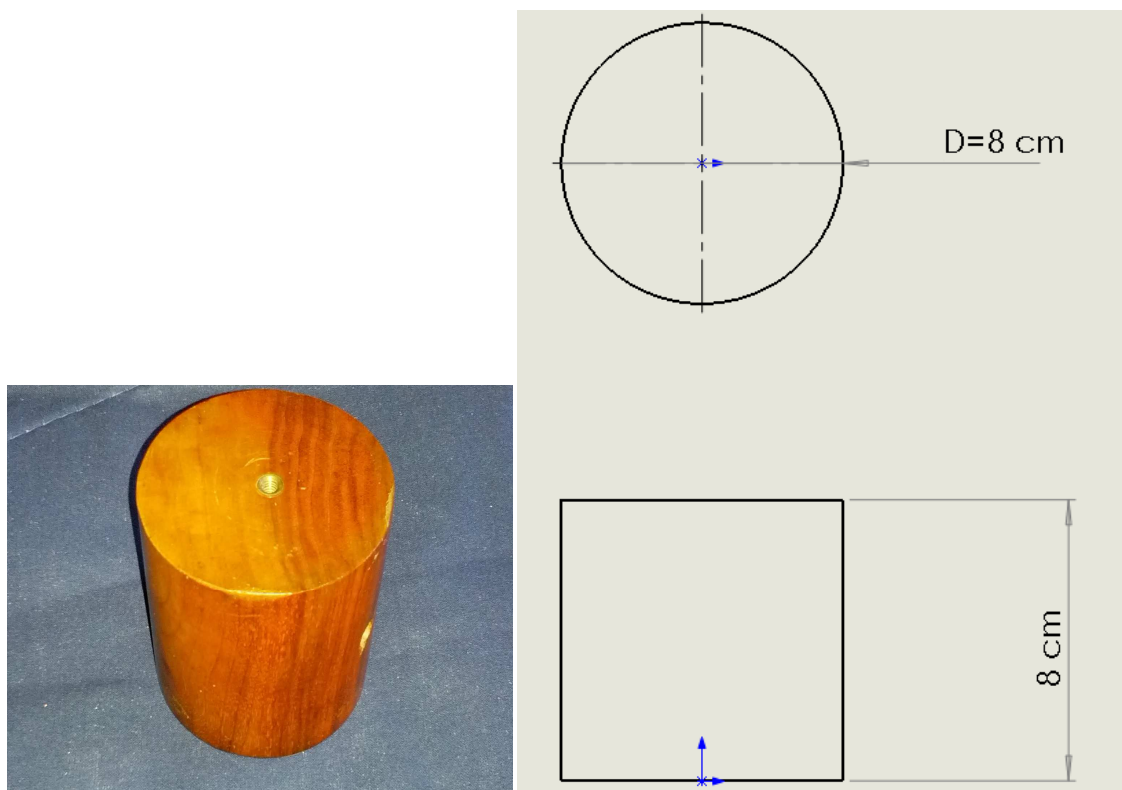


Figura 7.3.3 Cilindre usat

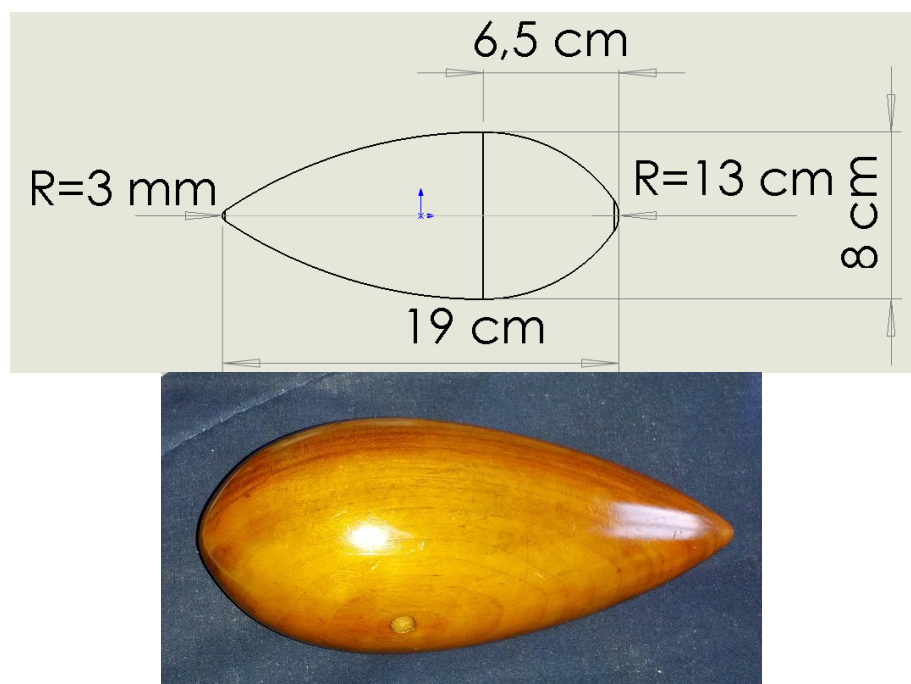


Figura 7.3.4 Cos fusiforme usat

7.4. Factors a tenir en compte en l'assaig

Obstrucció. Factors d'obstrucció de la maqueta dins la cambra d'assaig del túnel

Les condicions sota les quals un model es prova en un túnel de vent no són les mateixes que les que es troben en el corrent lliure ja que es produeixen variacions longitudinals dels gradients de pressió estàtica dins la cambra d'assaig. Aquestes pressions en una gran majoria es converteixen en forces que fan que els resultats siguin incorrectes. Aquest fet es pot resumir dient:

- La variació de la pressió estàtica a través de la cambra d'assaig d'un túnel produeix una força de resistència a l'avanç coneguda com "horizontal buoyancy". Normalment és petita en cambres d'assaig de vena tancada i negligible en vena oberta.
- La presència dels laterals de la cambra d'assaig produeix:
 - Una contracció lateral del flux per la presència del cos, coneguda com "solid blocking". En els túnels de vena tancada aquesta contracció incrementa la pressió dinàmica i totes les forces i moments. En els túnels de vena oberta és negligible.
 - Una contracció lateral del flux en el deixant del cos i coneguda com "wake blocking". Aquest efecte es veu incrementat a l'augmentar la grandària del deixant. En les cambres de vena tancada incrementa la força de resistència a l'avanç del model. És negligible amb vena oberta.
 - Diferents alteracions tridimensionals del flux que modifiquen tots els coeficients (de forma, de pressió, ...)

Malgrat tot, aquests efectes de bloqueig es poden corregir mitjançant l'aplicació de factors d'obstrucció.

Factor d'obstrucció beta: es defineix com el quocient entre la distància de la maqueta al sostre o terra de la cambra d'assaig i l'altura de la mateixa. ($\beta = A/H$).

Degut a que es tracta un problema tridimensional, sembla més raonable usar un factor d'obstrucció superficial O_s (secció perpendicular a la direcció del vent) i un altre factor d'obstrucció volumètric O_v .

Factor d'obstrucció superficial O_s :

$$O_s = (S_c - S_m)/S_c \text{ en } \%$$

On S_c és la superfície de la cambra d'assaig perpendicular al flux d'aire i S_m és la superfície de la projecció de la maqueta al pla perpendicular al flux d'aire. Aquest valor diu que l'àrea de pas de l'aire quan es troba amb la maqueta és de X% de l'àrea de pas abans i després de l'obstacle.

Factors d'obstrucció volumètrica O_v :

$$O_v = (V_c - V_m)/V_c \text{ en } \%$$

On V_c és el volum útil de la cambra i V_m és el volum de la maqueta. Aquest valor de X% indica el volum de pas que té el fluid en la cambra

7.4.1. Aplicació al túnel de l'ETSEIB

Tot seguit es mostren els factors d'obstrucció degut a l'ús de les maquetes utilitzades juntament amb les dades sobre la secció i el volum tant de les maquetes com de la cambra d'assaig del túnel.

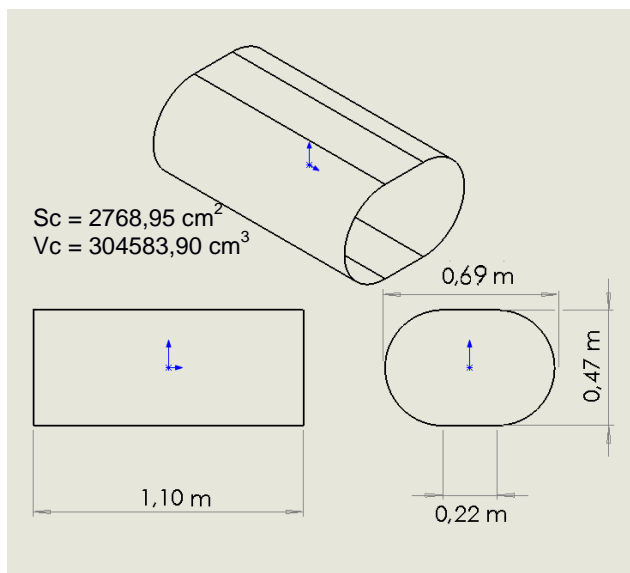


Figura 7.4.1.1 Cambra d'assaig

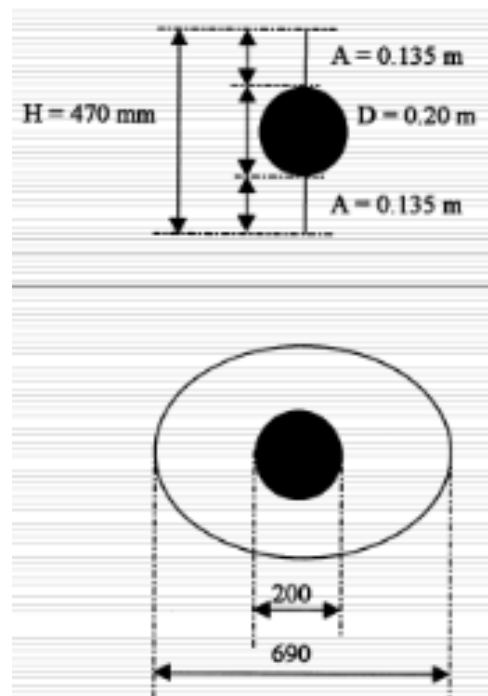


Figura 7.4.1.2 Exemple de paràmetres A i H

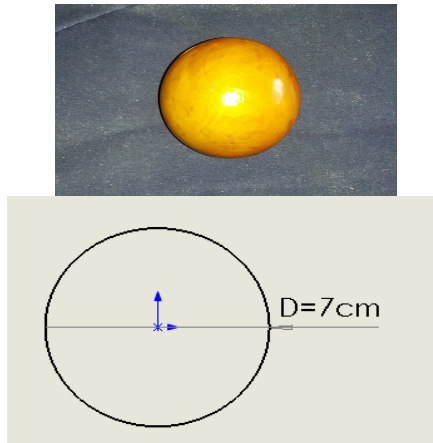


Figura 7.4.1.3 Esfera

$$\begin{aligned} S_c &= 2768,95 \text{ cm}^2 & S_m &= 38,48 \text{ cm}^2 \\ V_c &= 304583,90 \text{ cm}^3 & V_m &= 179,59 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

$$O\beta (\%) = A/H = 20/47 = 42,55\%$$

$$O_s (\%) = (S_c - S_m)/S_c = (2768,95 - 38,48)/2768,95 = 98,61\%$$

$$V_s (\%) = (V_c - V_m)/V_c = (304583,90 - 179,59)/304583,90 = 99,94\%$$

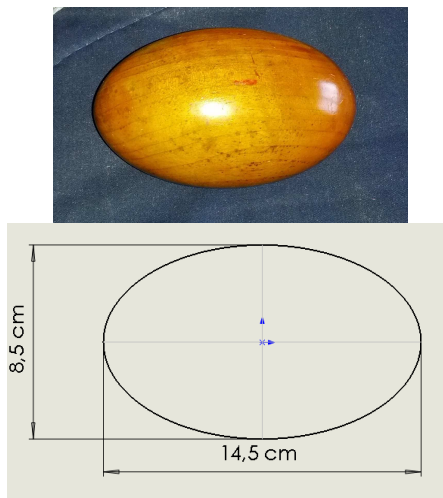


Figura 7.4.1.4 El·lipsoide

$$\begin{aligned} S_c &= 2768,95 \text{ cm}^2 & S_m &= 56,74 \text{ cm}^2 \\ V_c &= 304583,90 \text{ cm}^3 & V_m &= 548,53 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

$$O\beta (\%) = A/H = 18,25/47 = 38,83\%$$

$$O_s (\%) = (S_c - S_m)/S_c = (2768,95 - 56,74)/2768,95 = 97,95\%$$

$$V_s (\%) = (V_c - V_m)/V_c = (304583,90 - 548,53)/304583,90 = 99,82\%$$

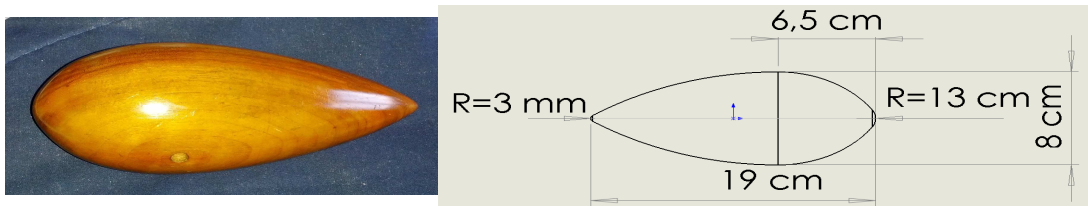


Figura 7.4.1.5 Cos fusiforme

$$Sc = 2768,95 \text{ cm}^2$$

$$Vc = 304583,90 \text{ cm}^3$$

$$Sm = 50,26 \text{ cm}^2$$

$$Vm = 548,33 \text{ cm}^3$$

$$O\beta (\%) = A/H = 19,5/47 = 41,49\%$$

$$Os (\%) = (Sc - Sm)/Sc = (2768,95 - 50,26)/2768,95 = 98,18\%$$

$$Vs (\%) = (Vc - Vm)/Vc = (304583,90 - 548,33)/304583,90 = 99,82\%$$

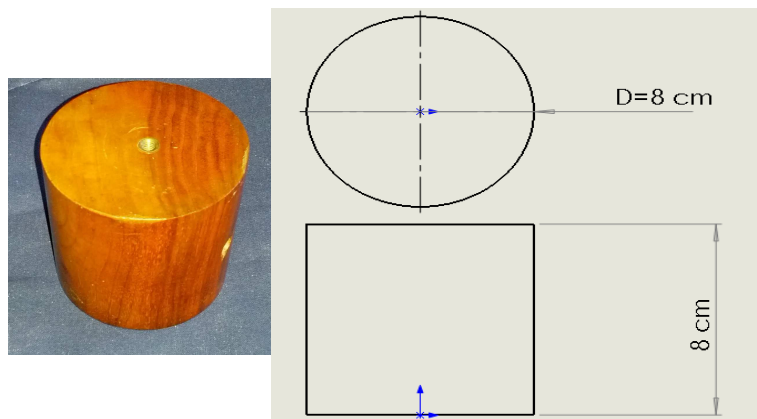


Figura 7.4.1.6 Cilindre amb incidència lateral

$$Sc = 2768,95 \text{ cm}^2$$

$$Vc = 304583,90 \text{ cm}^3$$

$$Sm = 64,00 \text{ cm}^2$$

$$Vm = 402,12 \text{ cm}^3$$

$$O\beta (\%) = A/H = 19,5/47 = 41,49\%$$

$$Os (\%) = (Sc - Sm)/Sc = (2768,95 - 64,00)/2768,95 = 97,69\%$$

$$Vs (\%) = (Vc - Vm)/Vc = (304583,90 - 402,12)/304583,90 = 99,87\%$$

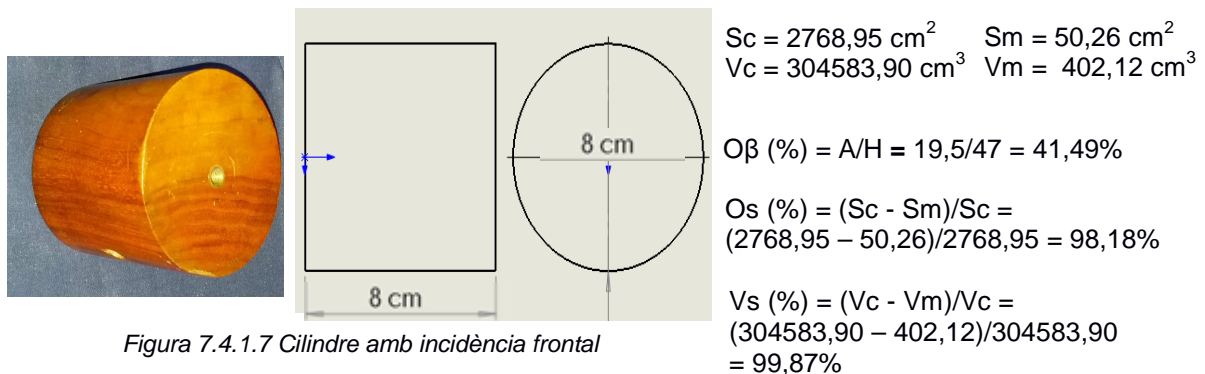


Figura 7.4.1.7 Cilindre amb incidència frontal

Com es pot apreciar en aquests càlculs, els factors d'obstrucció superficials i volumètrics, per tots els cossos, són quasi del 100%. Això significa que la contracció de l'aire originada a l'haver un cos en la direcció del flux és menyspreable.

A més a més, es pot pensar que com la cambra d'assaig del túnel de vent té una superfície, en aquesta pot produir-se el fenomen de la capa límit. Això és cert, però com les maquetes es disposen en una posició suficientment allunyades de les cares de la cambra d'assaig, la capa límit no tindrà un gruix tant gran com per arribar fins on estigui col·locat l'objecte.

7.5. Visualitzacions en el túnel de vent

Veure el que està succeint amb l'aire al voltant del cos pot ajudar a entendre el que està succeint, a més a més d'ajudar a produir millores aerodinàmiques. Entre aquests mètodes hi ha el dels "fils de llana". Amb cinta adhesiva es fixen els fils de llana en les zones que es volen estudiar i així s'indica la direcció del flux. Això però té un defecte, només es veu el flux a prop de la superfície.

Un altre mètode és observar les marques que deixen uns fluids que cauen sobre el cos. Aquesta forma de visualització es pot millorar usant líquids fluorescents perquè la influència d'un llum ultraviolat mostri les marques amb especial luminescència. Aquesta tècnica però, també permet examinar només les zones properes a la superfície.

Per últim, per estudiar les zones allunyades del cos, es pot usar el fum. La generació d'un deixant de fum s'aconsegueix mitjançant l'escalfament adequat d'un oli i fent passar el fum per un tub fins una sonda direccional que faci arribar el fum on es vulgui. L'inconvenient que té, però, és la toxicitat dels productes químics o olis calents usats.

7.6. Presa de mesures

Durant l'assaig en el túnel de vent, s'obtingran dos mesures: la velocitat de l'aire i la força en l'eix x (resistència a l'avanç).

Per a cadascuna de les maquetes, primerament es procedirà a collar aquesta a la cambra d'assaig amb els cargols que prèviament s'hi han introduït i amb un nivell s'acabaran de col·locar totalment horitzontals.

Un cop fixades, el següent pas és posar en marxa el túnel. Per això, primer de tot cal prémer el boto d'engegada del túnel i tot seguit el botó estrella-triangle. Un cop accionats, es mostra la velocitat del ventilador en una pantalla, una velocitat que es pot anar variant tot afloixant o desafloixant una rosca. Aquesta velocitat, però, no és la de la cambra d'assaig i, a més, està en revolucions per minut.

Per obtenir la velocitat que hi ha a la cambra d'assaig cal introduir una sonda de Prandtl en la cambra d'assaig i d'aquesta manera s'obtenen les diferències entre pressió total i estàtica en mil·libars. Per obtenir la velocitat en m/s s'aplica l'equació 7.2.1 havent passat prèviament els mil·libars a metres de columna d'aigua.

Per tal d'obtenir l'altre paràmetre d'interès, la força de resistència, s'usa el mesurador de força que incorpora el túnel de vent. Per a la correcta utilització d'aquest mesurador, caldrà calibrar prèviament la balança que recolza les maquetes i col·locar adequadament les galgues extensomètriques. Aquest mesurador mostra les forces i moments en tots els 3 eixos, però l'únic eix d'interès és l'horitzontal. Aquesta força, però, està expressada en kilograms de força i, per tant, caldrà convertir-los a Newtons.

Cal comentar, però, que durant la realització de l'assaig, el mesurador de força obté valors que oscil·len tot i que la velocitat estigui estabilitzada. És per això que s'ha agafat el valor més elevat i el més baix i s'ha fet la mitjana d'aquests ja que la diferència entre aquests valors era molt petita.

A més, es va produir un contratemps al cap d'una mitja hora després d'haver començat. De sobte, a l'augmentar la velocitat, la força anava disminuint quan en realitat s'hauria de produir l'efecte contrari. És per això que es va reiniciar el túnel degut a les moltes fluctuacions que hi havia i que alteraven el mesurador de força.

7.7. Experiència

Com ja s'ha comentat anteriorment, es van collar els objectes a la cambra d'assaig. A continuació es mostren unes imatges que permeten visualitzar-ho:



Figura 7.7.1 Fixació de les maquetes I



Figura 7.7.2 Fixació de les maquetes II

Durant l'assaig, a part d'obtenir els valors per tenir uns resultats numèrics també es va voler obtenir informació sobre el flux i la seva capa límit. Per a aquest propòsit es van enganxar uns trossos de fil de color verd neó (florescent) en algunes regions de les maquetes i, baixant les llums de la sala, es van il·luminar els cossos amb un llanterna de llum ultraviolada. Gràcies a això, es pot visualitzar la trajectòria del flux en els punts on hi hagi fils. L'objectiu és poder apreciar si la capa límit es desprèn o no.

Cilindre amb incidència frontal

Aquesta és la maqueta on, al no tenir canvis de radi, és com si s'estigués davant d'una placa plana per la cara lateral. Al ser una placa plana, no és té mai desprendiment de la capa límit. Llavors, com pot ser que si no hi ha canvi de geometria els fils no ressegueixin el contorn tal com es veu a la *figura 7.7.3* ? Això és degut a que el tram de capa límit laminar és menyspreable, és a dir que des d'un bon principi ja és té una capa límit turbulenta. Aquesta capa límit turbulenta és més caòtica i fa que es produeixin petites recirculacions d'aire de totes maneres, tal i com es pot veure observant el moviment dels fils. A més, es produeix un deixant just al principi de la cara lateral degut a l'impacte de l'aire contra la cara frontal, i les línies de corrent no poden adaptar-se al canvi de geometria de 90° , tot formant una zona turbulenta amb recirculacions de flux. Al final, a l'acabar-se la geometria, és com si hi hagués una separació de la capa límit i, al no haver-hi geometria, els fils no poden seguir cap contorn.

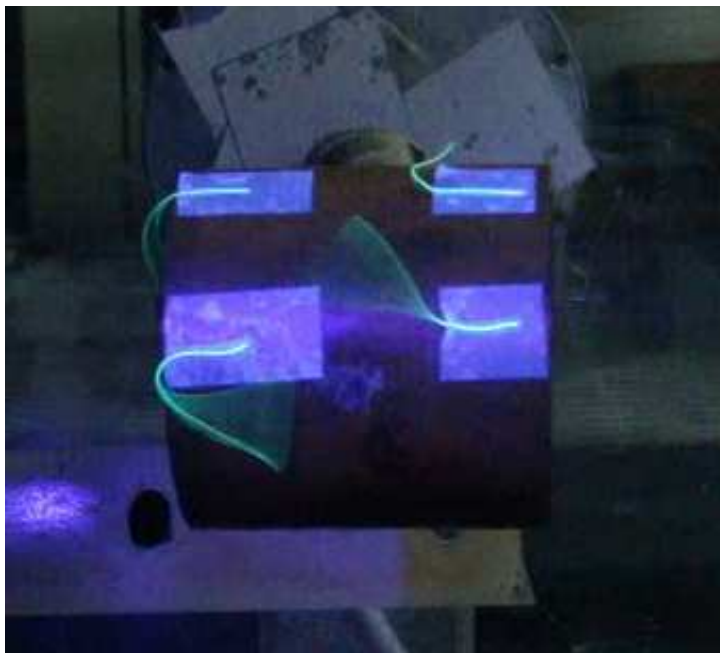


Figura 7.7.3 Flux en la maqueta cilíndrica amb la incidència a la cara frontal

Cilindre amb incidència lateral i Esfera

Aquests dos cossos ja tenen canvis de geometria. Malgrat tot, aquests no semblen gaire suaus i podria ser transcendental per l'experimentació. Ara, la capa límit laminar no es pot considerar negligible, per tant es produirà una transició a turbulenta.

Degut a les seves geometries, els dos són perfils amb variació d'alçada radial, però no acaba de ser un canvi suau. Al principi, com que el flux s'està accelerant es pot adaptar al contorn de la maqueta, però el problema apareix passat el punt de màxima alçada. Just aquest punt és on l'aire té la màxima velocitat i aquest punt coincideix amb el moment en que l'alçada comença a disminuir. Aquest fet fa que a l'aire li costi seguir el contorn del cos per l'aparició d'un gradient molt desfavorable de pressió que fa que la capa límit acabi desprenent-se ràpidament passat aquest punt, provocant l'aparició d'un deixant per on l'aire recircula.

Aquests fets es poden veure reflectits en les imatges posteriors, on els fils s'enganxen al cos durant el tram d'acceleració i es separen just passada l'alçada màxima

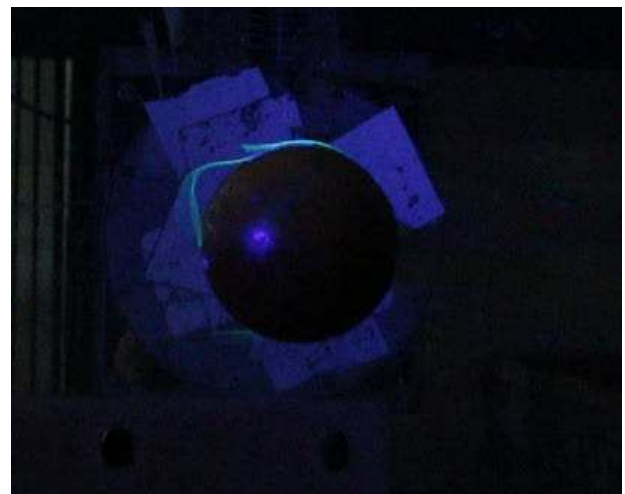
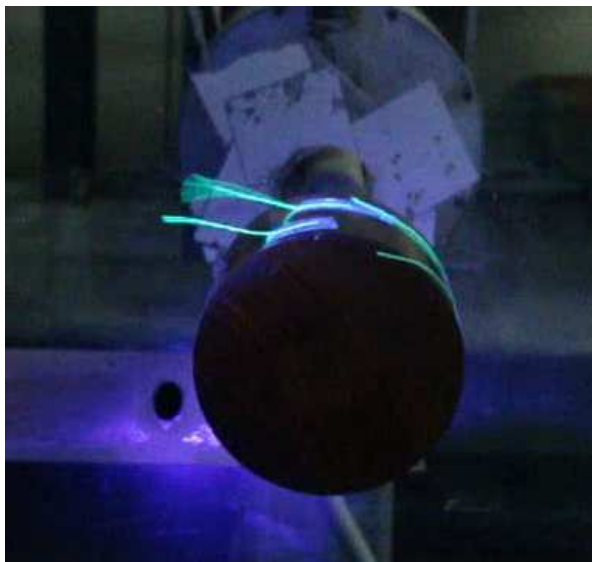


Figura 7.7.4 Flux en la maqueta cilíndrica amb la incidència a la cara lateral i en la maqueta esfèrica

El·lipsoide i Cos Fusiforme

Aquests dos cossos són els que posseeixen millor qualitat aerodinàmica. Al tenir canvis de pendent molt poc bruscos, el flux pot seguir ajustant-se al contorn del cos. D'aquesta manera, es segueix tenint una capa límit però no arriba a desprendre's perquè no es produeix un gradient de pressions prou desfavorable.

A la part inicial, com que l'aire impacte frontalment contra el cos, la velocitat és molt petita i va incrementant-se a mesura que l'aire ressegueix el contorn, donant pas a una disminució de la pressió. En el moment en que l'aire arriba al punt de màxima alçada de la maqueta la velocitat comença a disminuir. Malgrat tot, degut als canvis suaus de radi, el flux mai s'arriba a separar a causa de lo poc que disminueix la velocitat.

El cas del cos fusiforme és més òptim perquè la geometria final del cos és mes suau envers la de l'el·lipsoide, la qual augmenta fortament de radi al final.

Aquests són uns casos semblants al cas anterior de l'esfera pel que fa al tram inicial però, tal i com es veu en les imatges, els fils es mantenen units al cos a la part posterior ja que ara no hi ha un deixant.

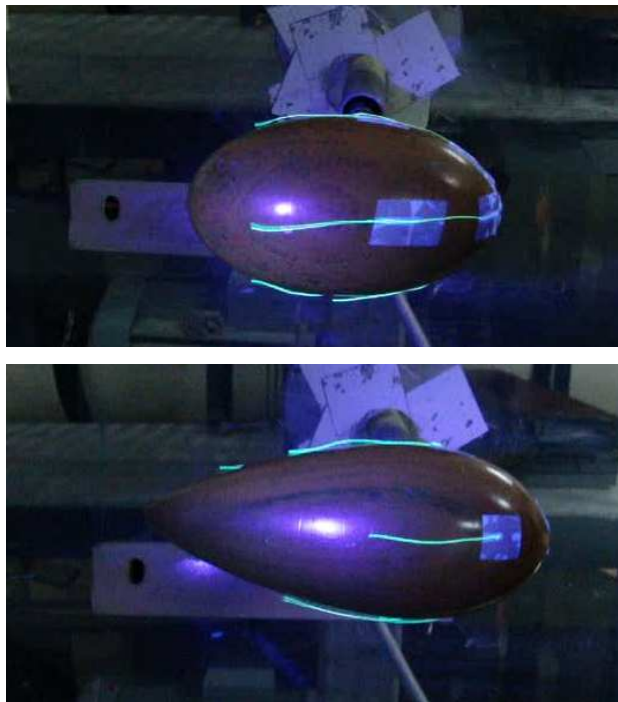


Figura 7.7.5 Flux en les maquetes en forma d'el·lipsoide i del cos fusiforme

Com s'observa en les dos imatges, els fils s'ajusten perfectament al contorn del cos. Això és degut a que, al no haver-hi separació de la capa límit, no es produeixen remolins que fan que l'aire recirculi.

7.8. Anàlisis de resultats

Un cop realitzat l'assaig, a continuació es mostren les dades obtingudes, a més de la conversió per passar-ho tot a unitats del sistema internacional.

Cilindre amb incidència frontal



← Direcció de l'aire incident

| h(mbar) | v(m/s) | F(kg força) | F(N) |
|---------|--------|-------------|---------|
| 1,9 | 17,625 | 0,102 | 1,00420 |
| 1,8 | 17,155 | 0,098 | 0,95956 |
| 1,7 | 16,671 | 0,087 | 0,85398 |
| 1 | 12,787 | 0,050 | 0,49443 |
| 0,7 | 10,698 | 0,039 | 0,38116 |

Taula 7.8.1 Dades obtingudes I

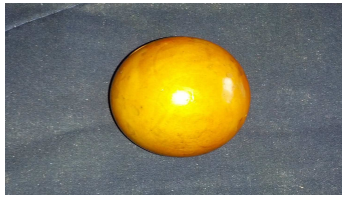
Cos fusiforme



← Direcció de l'aire incident

| h(mbar) | v(m/s) | F(kg força) | F(N) |
|---------|--------|-------------|---------|
| 1,75 | 16,915 | 0,018 | 0,17539 |
| 1,35 | 14,857 | 0,015 | 0,14296 |
| 0,9 | 12,131 | 0,010 | 0,09761 |
| 0,6 | 9,905 | 0,007 | 0,07262 |
| 0,45 | 8,578 | 0,006 | 0,05627 |

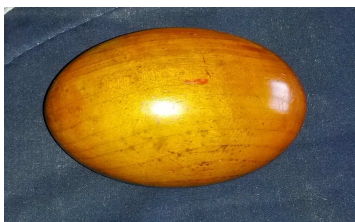
Taula 7.8.2 Dades obtingudes II

Esfera

← Direcció de l'aire incident

| h(mbar) | v(m/s) | F(kg força) | F(N) |
|----------------|---------------|--------------------|-------------|
| 1,65 | 16,425 | 0,045 | 0,44270 |
| 1,1 | 13,410 | 0,025 | 0,24654 |
| 0,7 | 10,698 | 0,017 | 0,16338 |
| 0,5 | 9,042 | 0,014 | 0,13712 |
| 0,3 | 7,004 | 0,007 | 0,06909 |

Taula 7.8.3 Dades obtingudes III

El·lipsoide

← Direcció de l'aire incident

| h(mbar) | v(m/s) | F(kg força) | F(N) |
|----------------|---------------|--------------------|-------------|
| 1,5 | 15,661 | 0,026 | 0,25698 |
| 1,15 | 13,712 | 0,022 | 0,21975 |
| 0,85 | 11,788 | 0,017 | 0,16324 |
| 0,4 | 8,087 | 0,009 | 0,08439 |

Taula 7.8.4 Dades obtingudes IV

Cilindre amb incidència lateral

← Direcció de l'aire incident

| h(mbar) | v(m/s) | F(kg força) | F(N) |
|----------------|---------------|--------------------|-------------|
| 1,95 | 17,856 | 0,089 | 0,86948 |
| 1,65 | 16,425 | 0,080 | 0,78242 |
| 1,35 | 14,857 | 0,049 | 0,48086 |
| 1,10 | 13,411 | 0,040 | 0,39244 |
| 0,65 | 10,310 | 0,028 | 0,27914 |

Taula 7.8.5 Dades obtingudes V

Malgrat tot, s'ha de tenir en compte la correcció del braç de suport de la balança dinamomètrica. Aquesta correcció segueix l'equació següent:

$$Y = 0,0025 \cdot X^2 + 0,068 \cdot X + 0,76$$

Equació 7.8.1 Correcció del braç

On Y són els grams de força (corresponents al braç) a restar a els valors totals anteriors i X són els metres de columna d'aire.

D'aquesta manera, els valors definitius són els que es mostren a continuació:

Cilindre amb incidència frontal

| h(mbar) | v(m/s) | F(kg força) | F(N) |
|----------------|---------------|--------------------|-------------|
| 1,9 | 17,625 | 0,088 | 0,86008 |
| 1,8 | 17,155 | 0,084 | 0,82313 |
| 1,7 | 16,671 | 0,074 | 0,72518 |
| 1 | 12,787 | 0,043 | 0,41752 |
| 0,7 | 10,698 | 0,033 | 0,32566 |

Taula 7.8.6 Dades corregides I

Cos fusiforme

| h(mbar) | v(m/s) | F(kg força) | F(N) |
|----------------|---------------|--------------------|-------------|
| 1,75 | 16,915 | 0,004 | 0,04278 |
| 1,35 | 14,857 | 0,004 | 0,04044 |
| 0,9 | 12,131 | 0,003 | 0,02789 |
| 0,6 | 9,905 | 0,002 | 0,02416 |
| 0,45 | 8,578 | 0,002 | 0,01824 |

Taula 7.8.7 Dades corregides II

Esfera

| h(mbar) | v(m/s) | F(kg força) | F(N) |
|----------------|---------------|--------------------|-------------|
| 1,65 | 16,425 | 0,032 | 0,31770 |
| 1,1 | 13,410 | 0,017 | 0,16238 |
| 0,7 | 10,698 | 0,011 | 0,10788 |
| 0,5 | 9,042 | 0,010 | 0,09563 |
| 0,3 | 7,004 | 0,004 | 0,04138 |

Taula 7.8.8 Dades corregides III

El·lipsoide

| h(mbar) | v(m/s) | F(kg força) | F(N) |
|----------------|---------------|--------------------|-------------|
| 1,5 | 15,661 | 0,015 | 0,14328 |
| 1,15 | 13,712 | 0,013 | 0,13195 |
| 0,85 | 11,788 | 0,010 | 0,09709 |
| 0,4 | 8,087 | 0,005 | 0,04981 |

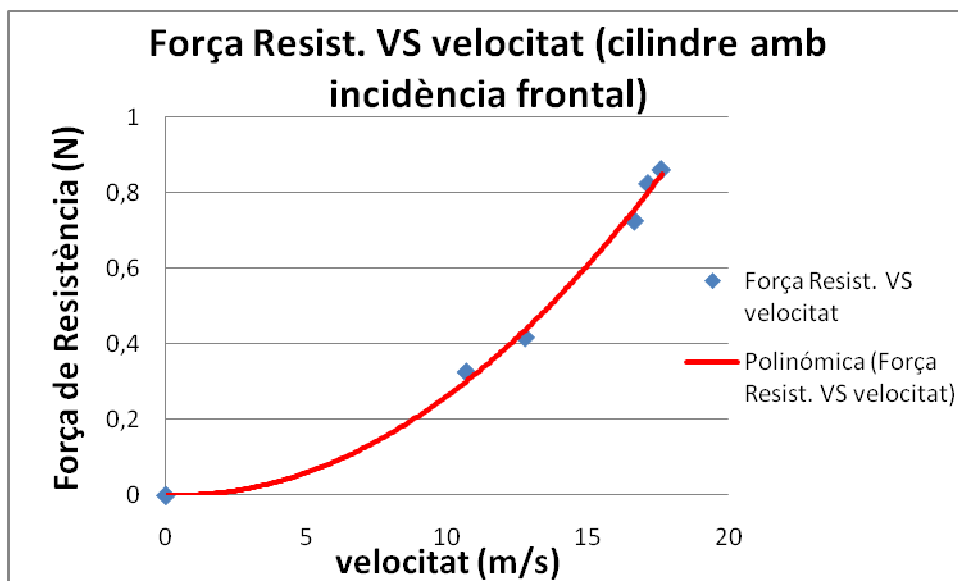
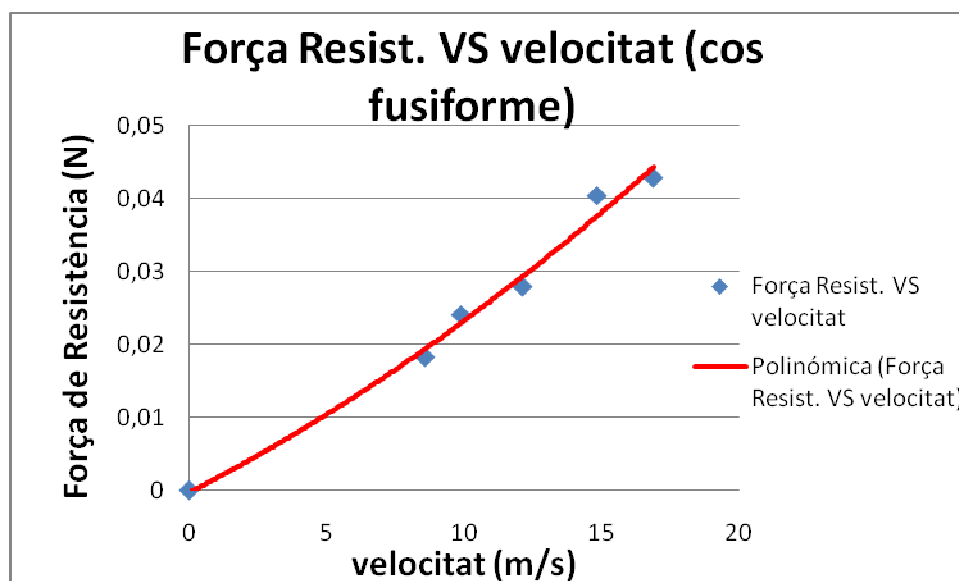
Taula 7.8.9 Dades corregides IV

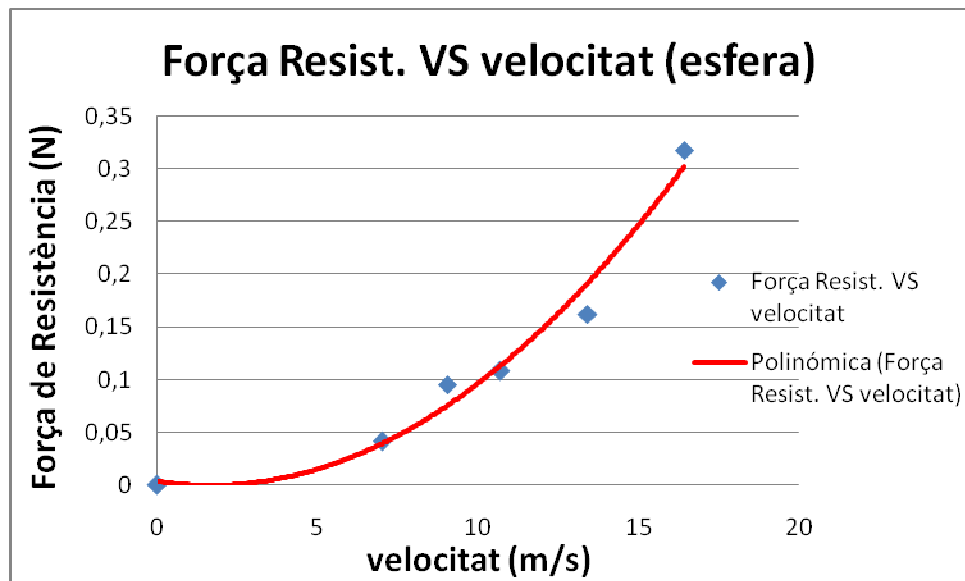
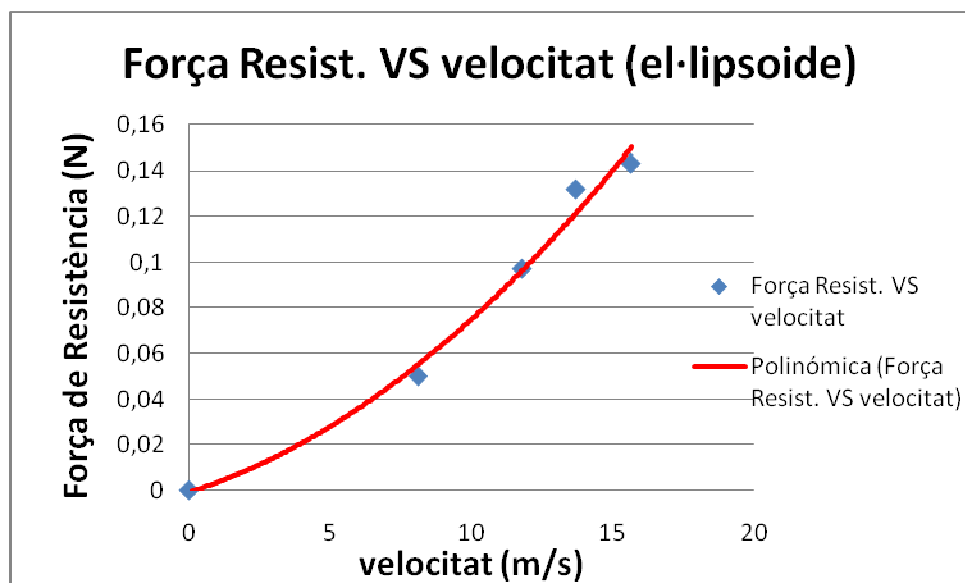
Cilindre amb incidència lateral

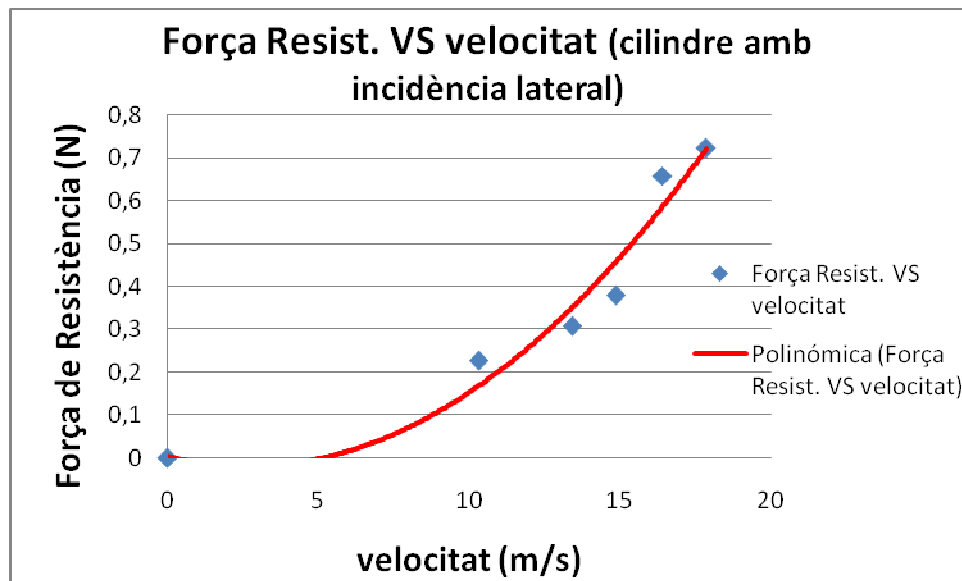
| h(mbar) | v(m/s) | F(kg força) | F(N) |
|---------|--------|-------------|---------|
| 1,95 | 17,856 | 0,074 | 0,72150 |
| 1,65 | 16,425 | 0,067 | 0,65742 |
| 1,35 | 14,857 | 0,039 | 0,37835 |
| 1,10 | 13,411 | 0,031 | 0,30828 |
| 0,65 | 10,310 | 0,023 | 0,22717 |

Taula 7.8.10 Dades corregides V

Tot seguit, s'ha procedit a representar els resultats de manera gràfica. Els dos tipus de gràfics que s'han representat són el de la Força de Resistència en front de la velocitat, i del Coeficient de Resistència en front del nombre de Reynolds.

Gràfic 7.8.1 $F(v)$ en el cilindre amb incidència frontalGràfic 7.8.2 $F(v)$ en el cos fusiforme

Gràfic 7.8.3 $F(v)$ en l'esferaGràfic 7.8.4 $F(v)$ en l'el·lipsoide



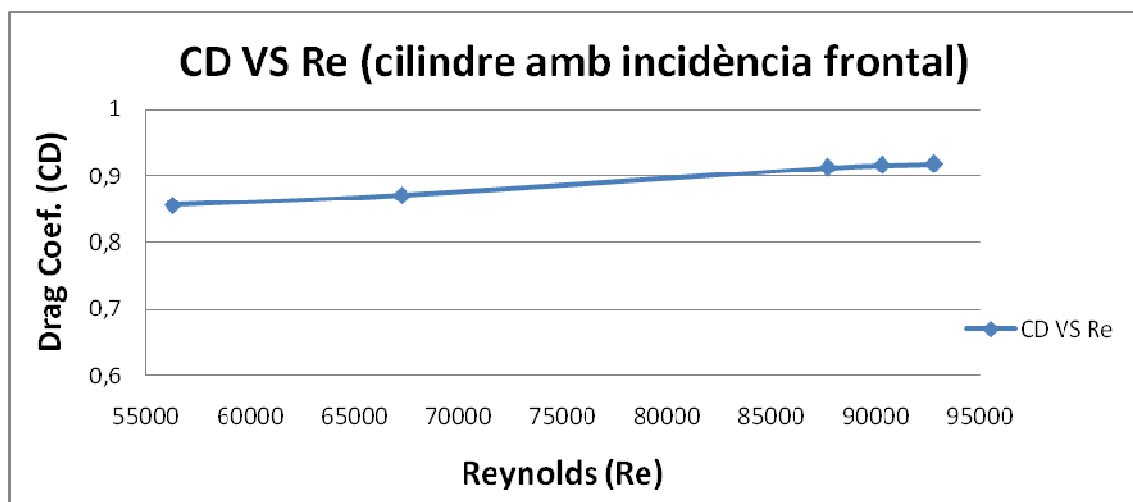
Gràfic 7.8.5 en el cilindre amb incidència lateral

Tal i com s'aprecia en els gràfics, aquests segueixen una polinòmica de grau 2 tal i com s'esperava degut a l'equació que segueix la força en funció de la velocitat.

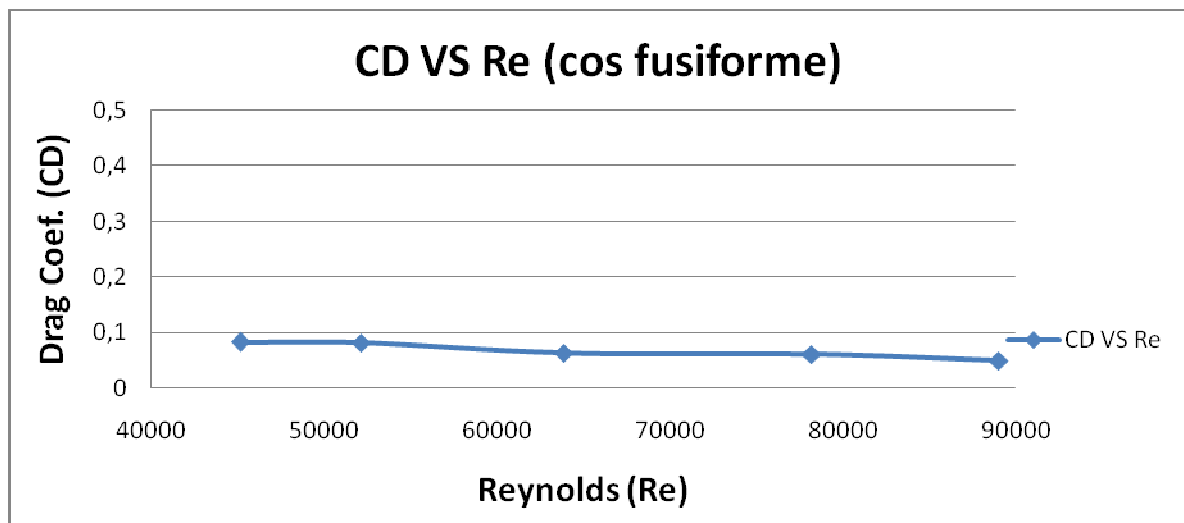
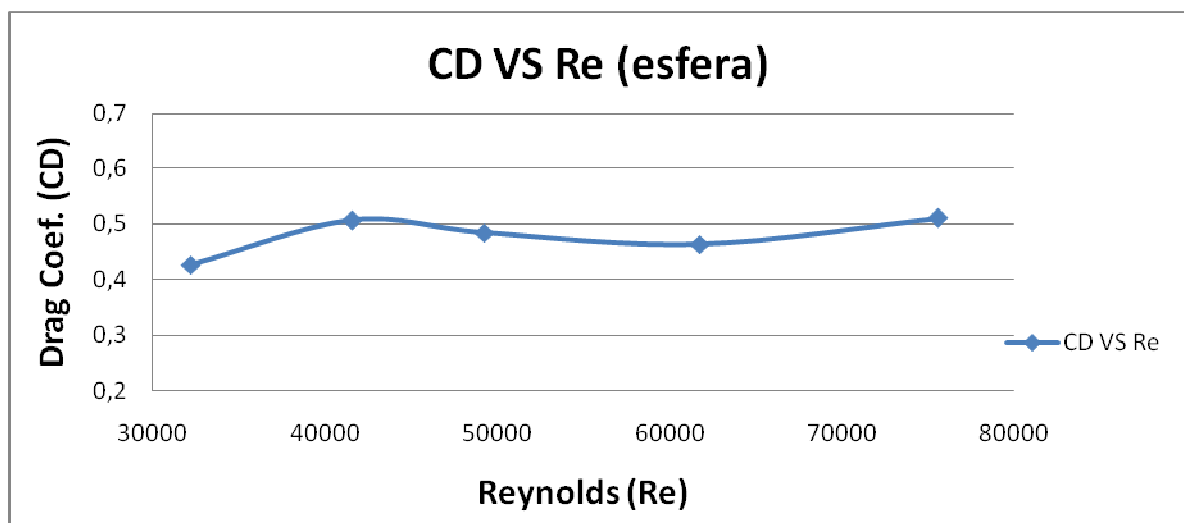
$$F_D = 0,5 \cdot C_D \cdot v^2 \cdot \rho \cdot A$$

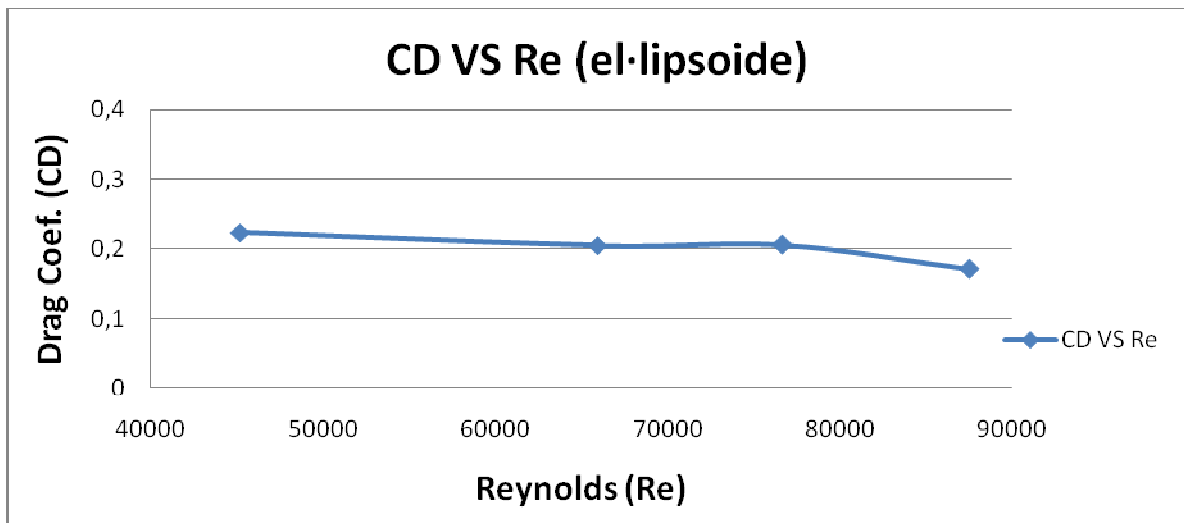
Equació 7.8.2 $F(v)$

Tot seguit, es mostren els gràfics corresponents al Coeficient de Resistència en front del nombre de Reynolds. Cal remarcar que per a una millor obtenció dels següents gràfics, els valors de força de resistència usats corresponen als de les corbes polinòmiques minimitzant, així, l'error comès en l'assaig del túnel de vent.

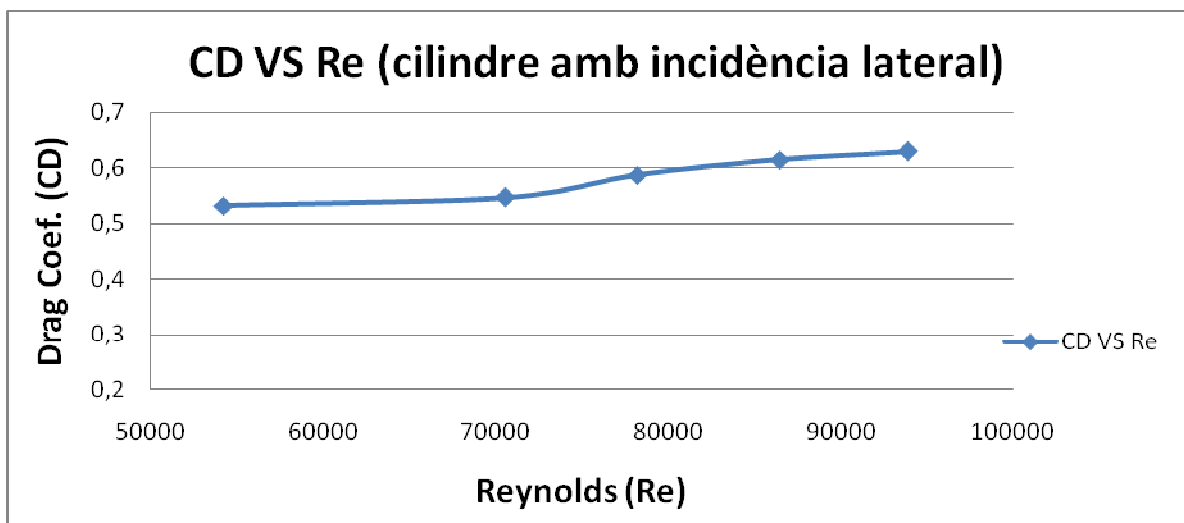


Gràfic 7.8.6 $CD(Re)$ en el cilindre amb incidència

*Gràfic 7.8.7 CD(Re) en el cos fusiforme**Gràfic 7.8.8 CD(Re) en l'esfera*



Gràfic 7.8.9 CD(Re) en l'el·lipsoide



Gràfic 7.8.10 CD(Re) en el cilindre amb incidència lateral

Aquests gràfics obtinguts seran analitzats i posteriorment comparats amb els gràfics obtinguts en les simulacions i amb el gràfics obtinguts de bibliografies.

8. Valors experimentals bibliogràfics de Coeficient de resistència a l'avanç

Abans de començar a realitzar els experiments i simulacions, i així trobar els valors del coeficient de resistència (C_d), cal fer una recerca per analitzar els coeficients experimentals que mostren els llibres i altres fonts d'informació. D'aquesta manera, es coneixeran els valors al voltant dels quals hauran d'estar els de les simulacions i experiments i, per tant, es sabrà si l'exercici s'està realitzant de manera correcta.

A continuació es mostren els valors bibliogràfics dels C_d dels cossos amb els quals es treballarà, és a dir el cilindre, l'el·lipsoide, l'esfera i el cos fusiforme per a valors del nombre Reynolds major que 10^4 ($Re \geq 10^4$).

8.1. Cilindre, esfera i el·lipsoide


| Body | Ratio | C_D based on frontal area |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------------------------|
| Flat-faced cylinder: | | |
|  | L/d 0.5 | 1.15 |
| | 1 | 0.90 |
| | 2 | 0.85 |
| | 4 | 0.87 |
| | 8 | 0.99 |

Figura 8.1.1 C_d d'un cilindre (I) [1]

Recordar que les relacions geomètriques dels cossos a tractar son:

Esfera: $L/d = 1$

Cilindre: $L/d = 1$

El·lipsoide: $L/d = 14,5/8,5 = 1,7$

Perfil: $L/d = 2,37 \approx 2,4$

$d/L = 0,42 \approx 0,4$

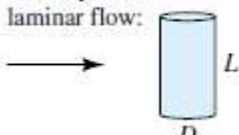
| Body | C_D based on frontal area | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| Short cylinder, laminar flow: |  | L/D | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 | 20 | 40 |
| | | C_D | 0.64 | 0.68 | 0.72 | 0.74 | 0.82 | 0.91 | 0.98 |
| | | | | | | | | | 1.20 |

Figura 8.1.2 C_d d'un cilindre (II) [1]

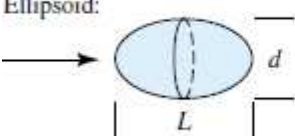
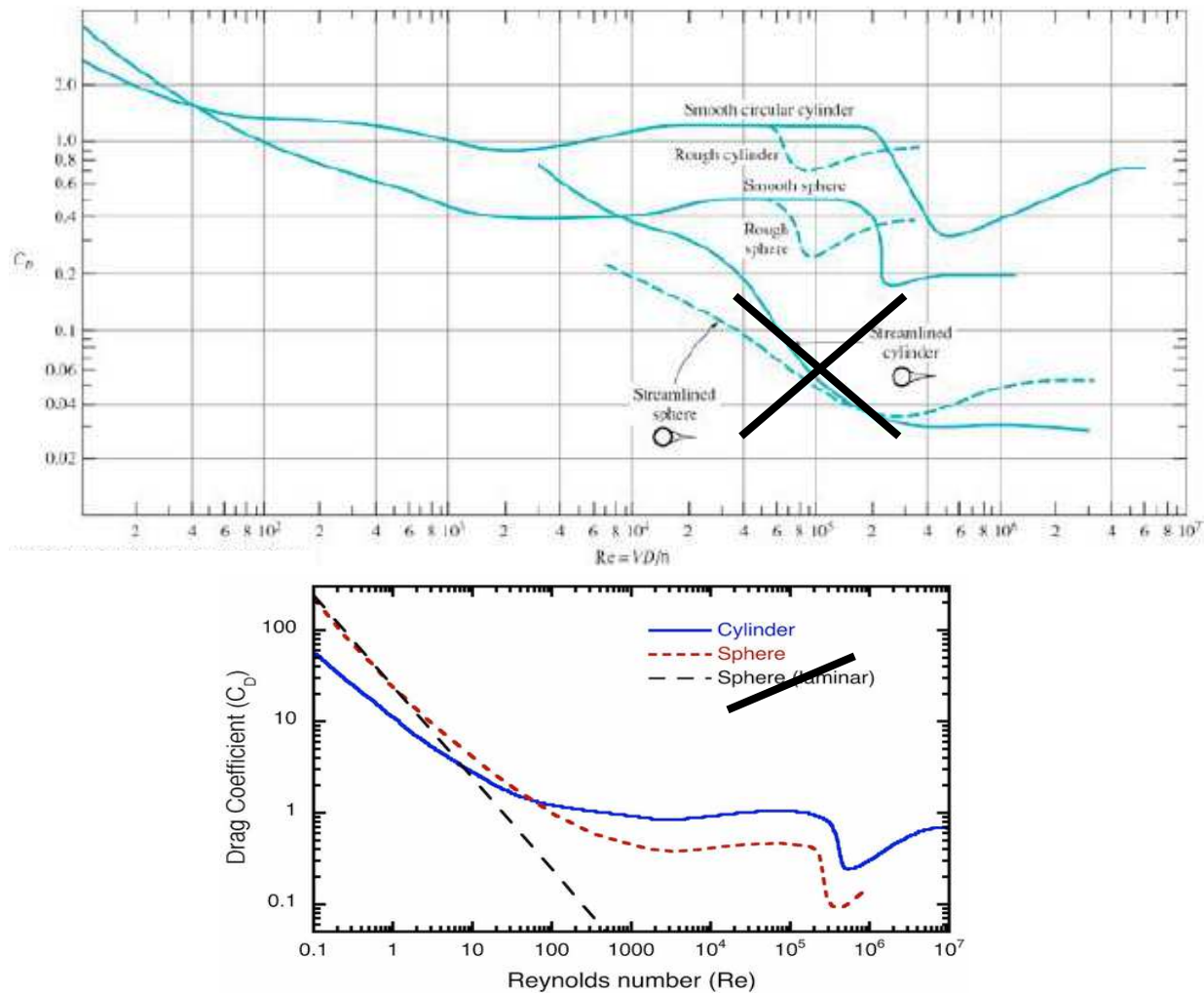
| Body | Ratio | C_D based on frontal area | |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------|
| | | Laminar | Turbulent |
| Ellipsoid: |  | L/d 0.75 | 0.5 |
| | | 1 | 0.47 |
| | | 2 | 0.27 |
| | | 4 | 0.25 |
| | | 8 | 0.2 |
| | | | 0.08 |

Figura 8.1.3 C_d d'una el·lipsoide [1]

Tot seguit es mostraran uns gràfics amb el mateix contingut, però amb millor contingut visual que les taules anteriors. En els casos tractats, al treballar amb maquetes de fusta i vernissatges, la rugositat serà negligible. A més es treballarà amb $Re \geq 10^4$. És per això que cal fixar-se en els gràfics que fan referència a cossos llisos (Smooth, no Rough) i condicions no laminars (Re elevats).



Gràfic 8.1.1 C_d en funció del nombre de Reynolds (I) [1] i [11]

Com s'observa, en les dos fonts la informació és la mateixa o molt semblant. És per això que es pot concloure que els valors que s'obtidran en la simulació i el túnel hauran de correspondre amb els d'aquests gràfics.

8.2. Cos fusiforme

Aquest tipus de perfils es defineixen a partir de la longitud (L) o corda, i el diàmetre màxim (D) o gruix (thickness).

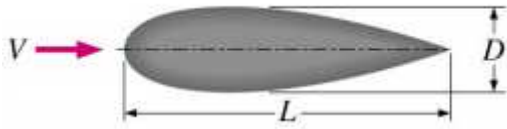


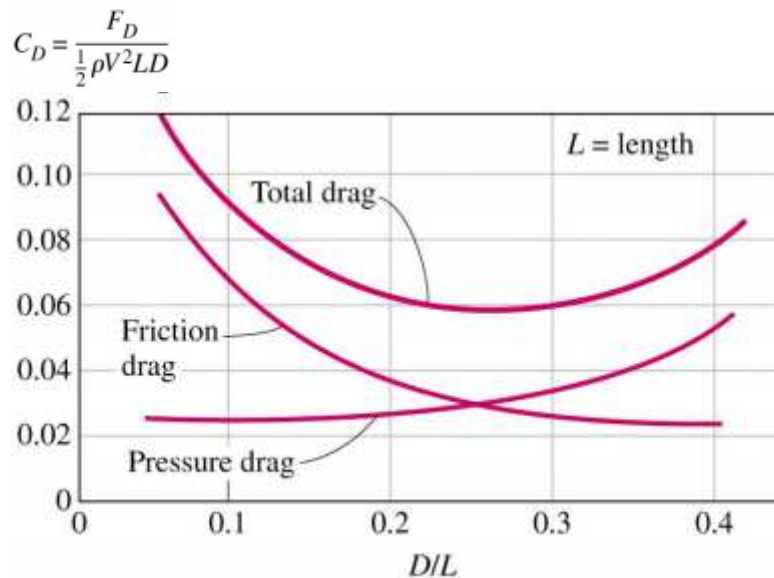
Figura 8.2.1 Cos fusiforme [4]

Recordar que les relacions geomètriques del perfil són:

Perfil: $L/D = 2,37 \approx 2,4$

$D/L = 0,42 \approx 0,4$

En el gràfic de sota, s'aprecia la tendència teòrica del Coeficient de resistència a l'avanç segons la relació D/L.



Gràfic 8.2.1 C_d en funció de la relació D/L [4]

Un cop ja es disposa dels valors de referència, ja es podrà procedir a realitzar els experiments i simulacions on s'hauria d'obtenir valors semblants als continguts en els gràfics anteriors.

8.3. Altres fonts bibliogràfiques

A continuació s'adjunta més informació sobre els coeficients de resistència a l'avanç per tenir més dades amb les que comparar els resultats de la simulació i de l'experiment amb el túnel de vent. Com que els valors il·lustrats en els llibres de text són fruit també d'experiments realitzats, és millor tenir diverses fonts bibliogràfiques de manera que el rang de variabilitat s'ampliï una mica.

| 1. Sphere | $\frac{\pi D^2}{4}$ | <table><tr><th>Re</th><th>10^2</th><th>10^3</th><th>10^4</th><th>10^5</th><th>10^6</th><th>5×10^6</th></tr><tr><th>C_D</th><td>1.0</td><td>0.41</td><td>0.39</td><td>0.52</td><td>0.12</td><td>0.18</td></tr></table> <p>Also see Fig. 10-22.</p> | Re | 10^2 | 10^3 | 10^4 | 10^5 | 10^6 | 5×10^6 | C_D | 1.0 | 0.41 | 0.39 | 0.52 | 0.12 | 0.18 |
|----------------------------|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|-----------------|--------|--------|-----------------|-------|-----|------|------|------|------|------|
| Re | 10^2 | 10^3 | 10^4 | 10^5 | 10^6 | 5×10^6 | | | | | | | | | | |
| C_D | 1.0 | 0.41 | 0.39 | 0.52 | 0.12 | 0.18 | | | | | | | | | | |
| 4. Ellipsoid of Revolution | $\frac{\pi D^2}{4}$ | $0.44(D/L) + 0.016(L/D) + 0.016(D/L)^{1/2}$ $1 < L/D < 10$. $Re < 2 \times 10^5$, Ref. 10-102. | | | | | | | | | | | | | | |

| 7. Circular Rod Parallel to Flow | $\frac{\pi D^2}{4}$ | <table><tr><th>L/D</th><th>C_D</th></tr><tr><td>∞</td><td>1.15</td></tr><tr><td>0.5</td><td>1.10</td></tr><tr><td>1.0</td><td>0.93</td></tr><tr><td>1.5</td><td>0.85</td></tr><tr><td>2.0</td><td>0.83</td></tr><tr><td>3.0</td><td>0.85</td></tr><tr><td>4.0</td><td>0.85</td></tr><tr><td>5.0</td><td>0.85</td></tr></table> | L/D | C_D | ∞ | 1.15 | 0.5 | 1.10 | 1.0 | 0.93 | 1.5 | 0.85 | 2.0 | 0.83 | 3.0 | 0.85 | 4.0 | 0.85 | 5.0 | 0.85 |
|-------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------|----------|------|------|------|------|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|----------|------|
| L/D | C_D | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ∞ | 1.15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.5 | 1.10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.0 | 0.93 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.5 | 0.85 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2.0 | 0.83 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.0 | 0.85 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4.0 | 0.85 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5.0 | 0.85 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11. Cylindrical Rod Perpendicular to Flow | LD | <table><tr><th>L/D</th><th>C_D</th></tr><tr><td>1.0</td><td>0.64</td></tr><tr><td>1.98</td><td>0.68</td></tr><tr><td>2.96</td><td>0.74</td></tr><tr><td>5.0</td><td>0.74</td></tr><tr><td>10.</td><td>0.82</td></tr><tr><td>20.</td><td>0.91</td></tr><tr><td>40.</td><td>0.98</td></tr><tr><td>∞</td><td>1.20</td></tr></table> | L/D | C_D | 1.0 | 0.64 | 1.98 | 0.68 | 2.96 | 0.74 | 5.0 | 0.74 | 10. | 0.82 | 20. | 0.91 | 40. | 0.98 | ∞ | 1.20 |
| L/D | C_D | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.0 | 0.64 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.98 | 0.68 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2.96 | 0.74 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5.0 | 0.74 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10. | 0.82 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20. | 0.91 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 40. | 0.98 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ∞ | 1.20 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Figura 8.3.1 Complementació bibliogràfica [3]

9. Simulació numèrica

9.1. Introducció del programari

Tal i com s'ha comentat en el punt 6 Dinàmica de fluids computacional, s'utilitzarà la metodologia CFD per a dur a terme la part de simulació. Per a la realització d'aquesta simulació es treballarà amb l'*Ansyes Workbench* i el seu sistema d'anàlisis *Fluid flow CFX*.

Aquest programari divideix la simulació en cinc fases, fases que s'han de realitzar en ordre per a la correcta introducció de paràmetres i posterior visualització dels resultats. Aquestes parts són les següents:

Geometry: es crea la geometria que es vol simular mitjançant l'elaboració de croquis i eines 3D. Aquesta etapa permet la importació de geometries creades prèviament amb altres programes CAD.

Mesh: en aquesta etapa es dur a terme el mallat, que consisteix en la discretització del domini a estudiar en elements finits.

Setup: s'introdueixen les condicions de contorn juntament amb les característiques del flux i es pot realitzar un seguiment de les variables que es desitgi estudiar.

Solution: es duen a terme els càlculs de la simulació.

Results: es poden visualitzar els resultats en la zona que es desitgi mitjançant la creació de plans, vectors...

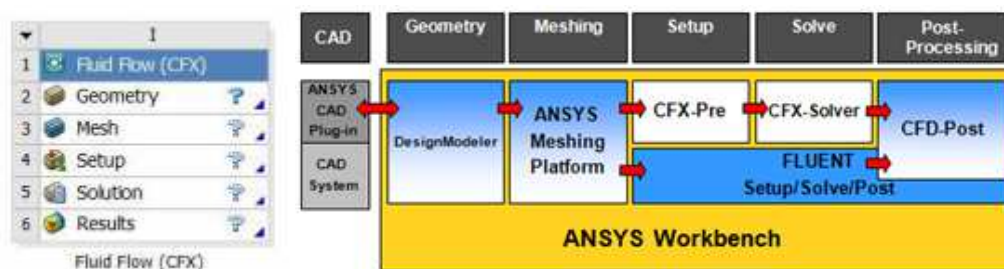


Figura 9.1.1 Estructura Ansyes Workbench [8]

9.2. Simulació del les maquetes

A continuació, es procedirà a introduir la geometria de les diferents maquetes, juntament amb les seves condicions de contorn corresponents, i es duran a terme les simulacions.

9.2.1. Geometria (Geometry)

Aquest apartat s'exposa conjuntament per totes les maquetes ja que s'ha seguit el mateix procediment per la introducció de la geometria. Els passos que s'han dut a terme són els següents:

- Obrir el CFX amb el workbench

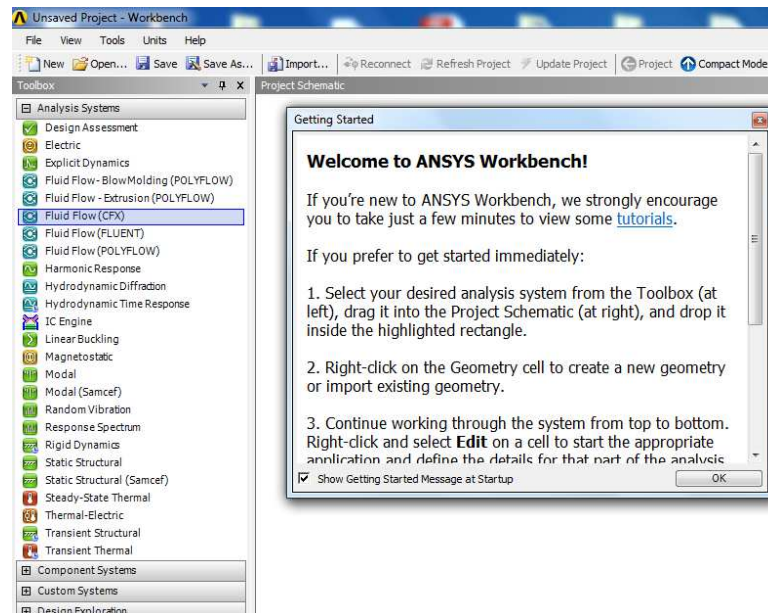


Figura 9.2.1.1 Ansys Workbench

- Crear i importar la geometria del solidworks

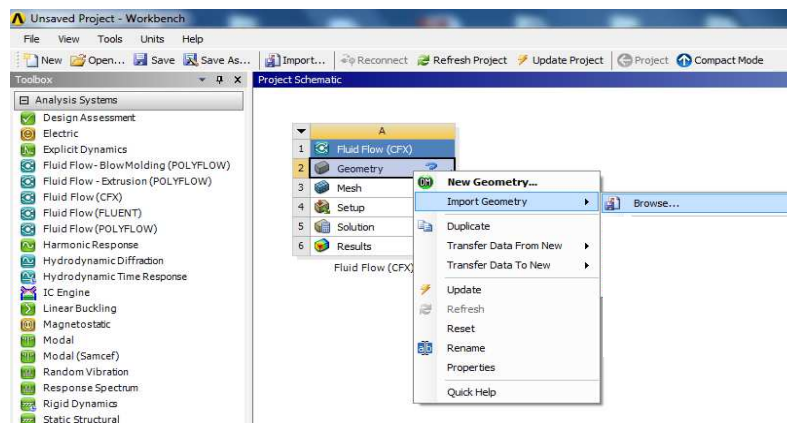


Figura 9.2.1.2 Import geometry

La creació de la geometria consisteix en extruir la cambra d'assaig com si es tractés d'un sòlid ple interiorment, podent així seleccionar posteriorment les cares frontal i posterior per tractar-les com entrades i sortides. A més, en el mateix sòlid, s'ha de crear la maqueta que es vol estudiar. Per fer-ho, enlloc de crear un altre sòlid, es crearà una cavitat interior amb la geometria desitjada (veure *figura 9.2.1.3*). Aquest detall es pot veure en la *figura 9.1.2.4* on es talla el sòlid pel pla alçat, fet que permet veure que efectivament hi ha una cavitat en el seu interior.

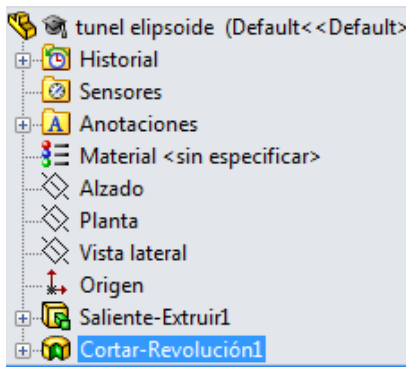


Figura 9.2.1.3 Creació de la geometria

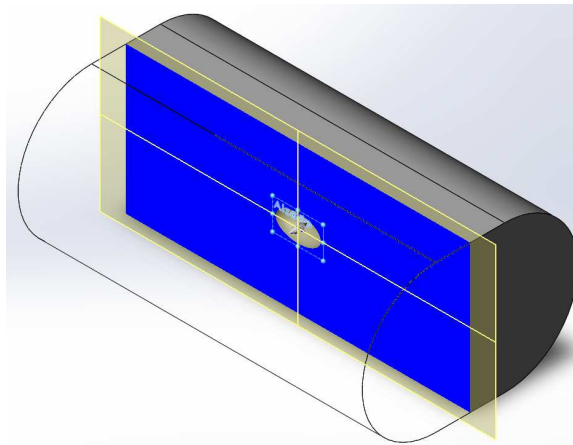


Figura 9.2.1.4 Tall de secció

A l'importar la geometria s'obté a l'Ansys una visualització com la de la *figura 9.2.1.6*. Hi ha un problema però, l'Ansys detecta dos sòlids (maqueta i cambra) malgrat haver realitzat una cavitat i no una altra extrusió. Aquest problema es resol aplicant unes operacions tal i com es mostra en "l'outline tree" (arbre resum d'operacions) de la *figura 9.2.1.5*:

- "Enclosure": aquesta opció consisteix en fer dir-li al programa que el sòlid cambra d'assaig és una regió per on circularà el fluid, i que el sòlid maqueta és el cos d'estudi ("target body")
- "Boolean": un cop realitzat "l'enclosure", ja se li pot dir al programa que fusioni els dos cossos, fusionant els dos cossos en un únic sòlid amb una cavitat interior.

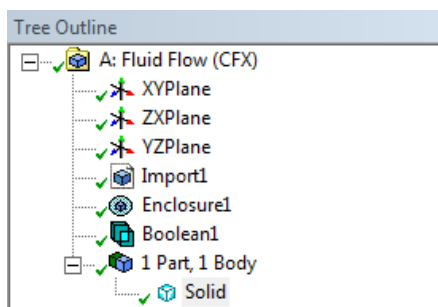


Figura 9.2.1.5 Outline tree

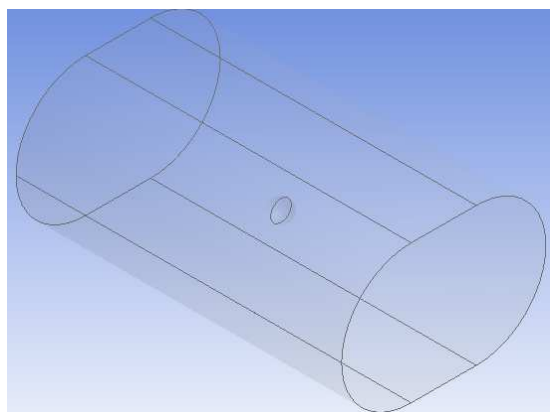


Figura 9.2.1.6 Visualització de la geometria

9.2.2. Mallat (Mesh)

L'operació mesh també s'exposa conjuntament ja que en cada simulació caldrà mallar la geometria (cambra d'assaig+maqueta). En les simulacions la cambra d'assaig sempre és la mateixa i les maquetes, tot i ser diferents, posseeixen una forma semblant degut a la seva geometria amb corbes. És per això que el mallat que es realitzi s'adaptarà a cada una de les maquetes.

Per a trobar un mallat amb el que posteriorment s'obtinguin bons resultats, un cop s'hagin introduït els diversos mallats de prova, es crearà un pla en la direcció del flux que passi just pel mig de la geometria, pla que es pot veure en la *figura 9.2.2.1*. Aquest pla servirà per analitzar una variable qualsevol veient així els valors que s'obtenen en cada regió d'aquest pla. Tal i com es mostra a la *figura 9.2.2.2*, la variable escollida és la velocitat. Gràcies a això, es podran comparar els valors de les velocitats de cada mallat en els punts importants de la geometria és a dir, la maqueta i la superfície de la cambra.

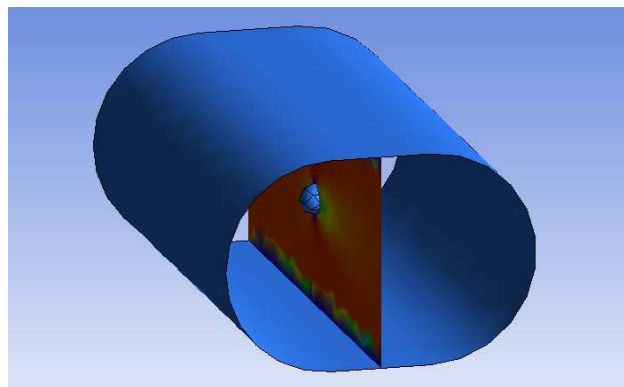


Figura 9.2.2.1 Pla d'estudi

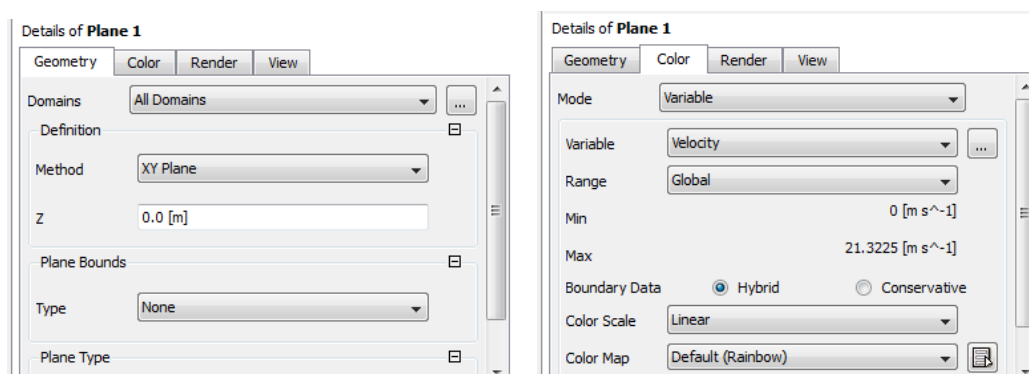


Figura 9.2.2.2 Variable d'estudi

Per a l'obtenció del millor mallat, se n'estudiaran molts tipus. En cas que n'hi hagi un on els resultats que s'obtinguin siguin significativament millors que els altres, s'escollirà aquest. Si no s'aprecia cap diferència significativa entre els mallats, s'optarà per seleccionar el mallat més senzill ja que, així, la velocitat de computació serà més alta.

- Primer mallat

El primer mallat que s'ha realitzat és l'automàtic per l'Ansys (veure *figura 9.2.2.3*). Aquest, és un mallat format únicament amb el mateix element, l'element triangular. Com que detecta que en l'interior hi ha una geometria amb superfícies corbes, el mallat que millor s'hi ajusta és aquest. Malgrat tot, és un mallat amb una qualitat molt baixa i pot ser que, com que els elements són molt grans, els resultats obtinguts siguin molt poc precisos. Això es mostra en la *figura 9.2.2.4*, on, gràcies a un tall de secció transversal, es veu com els elements de contacte amb la superfície de la cambra d'assaig són massa grans.

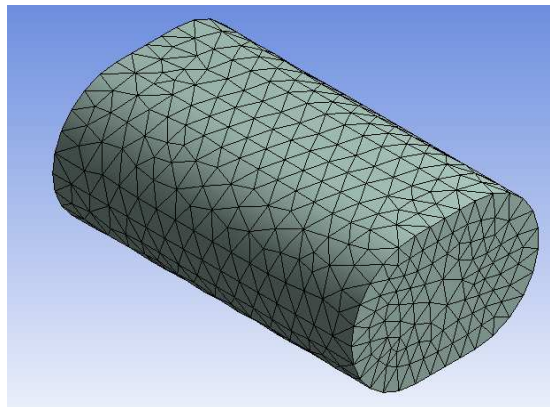


Figura 9.2.2.3 Mallat automàtic

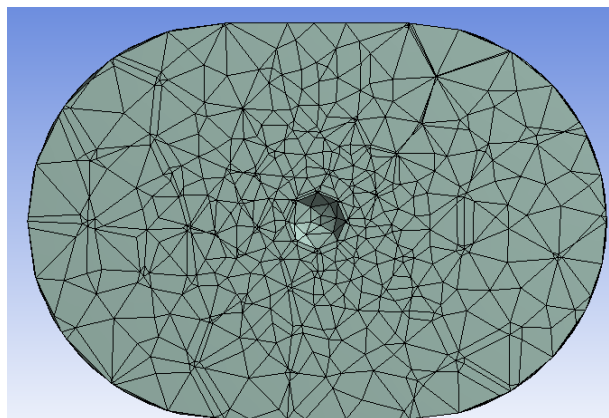


Figura 9.2.2.4 Tall de secció transversal I

A continuació es procedeix a comprovar si les sospites plantejades eren certes, tot observant la qualitat dels resultats:

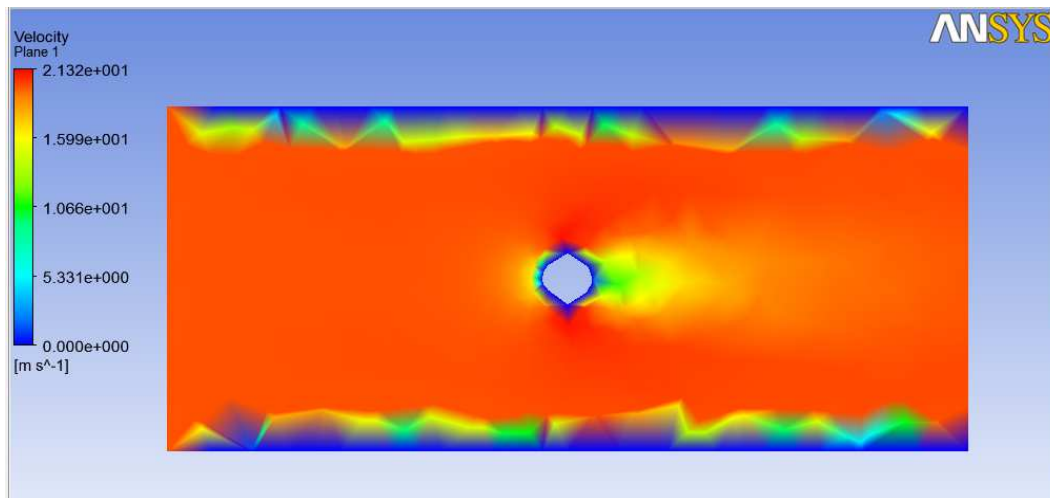


Figura 9.2.2.5 Resultats I

Tal i com mostra la *figura 9.2.2.5*, els resultats obtinguts són bastant pobres. N'és un exemple la poca precisió que es mostra a la capa límit produïda a la superfície interior de la cambra d'assaig, ja que no queda gens clar el gruix d'aquesta capa degut a la seva baixa uniformitat. És per això que s'optarà per intentar optimitzar el mallat.

- Segon mallat

El segon mallat consisteix en una millora del creat anteriorment. Aquesta millora consisteix en refinar la malla tot reduint la dimensió dels seus elements. Gràcies a les *figures 9.2.2.6 i 9.2.2.7* es pot observar el grau de millora d'aquest mallat.

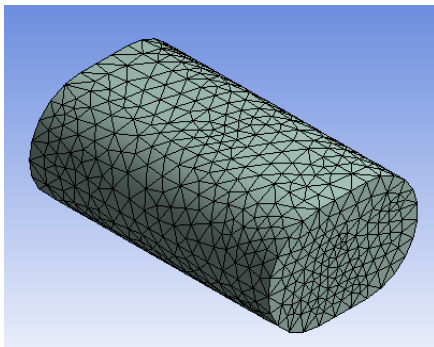


Figura 9.2.2.6 Mallat millorat

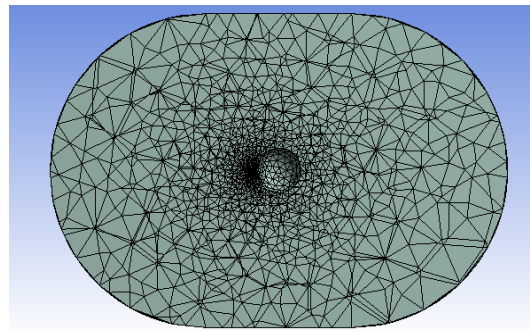


Figura 9.2.2.7 Tall de secció transversal II

Amb el nou mallat, s'aprecia la reducció de la dimensió dels elements i el refinament de la malla en la regió propera a la maqueta, punt on hi haurà molta variació de les variables d'estudi degut, per exemple, a l'aparició d'un punt d'estancament.

En la figura 9.2.2.8 s'observen els resultats obtinguts un cop s'ha refinat el mallat.

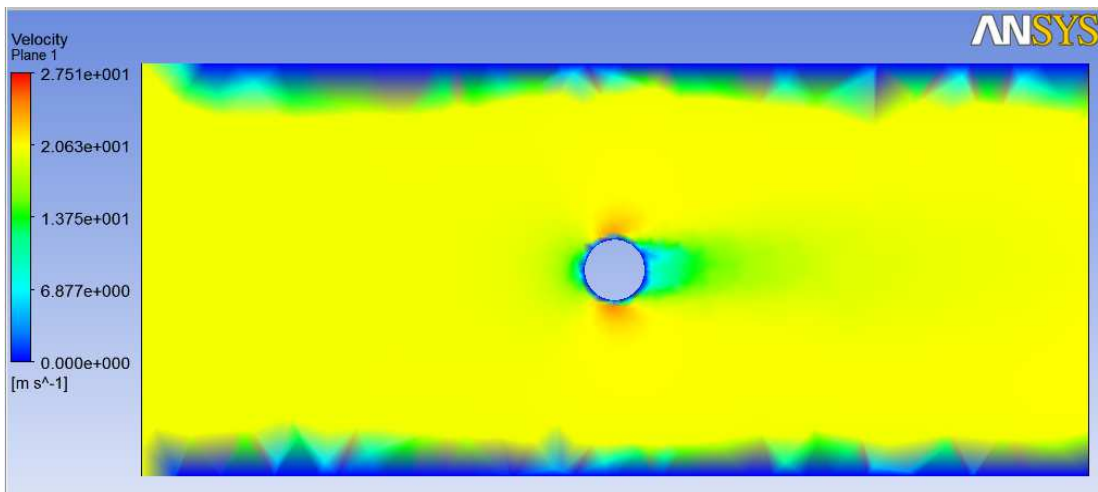


Figura 9.2.2.8 Resultats II

Gràcies a aquest nou mallat, s'obtenen molt millors resultats a les zones properes a la maqueta. Tot i això, malgrat les petites millores en la superfície interior de la cambra, si que és cert que la capa límit s'uniformitza una mica més al llarg de la direcció del fluid, però aquesta uniformitat no és simètrica respecte l'eix de la direcció del fluid. D'aquesta manera sembla que la capa límit originada a la part superior de la cambra sigui diferent a la de sota, fet que és impossible degut a la total simetria que hi ha tant en la maqueta com en la cambra.

Així doncs, es buscarà una millora en el mallat proper a la cambra deixant tal com està el mallat proper a la maqueta.

- Tercer mallat

Com s'ha comentat, l'objectiu d'aquest nou mallat, és el refinament de les capes properes a la superfície de la cambra. Per a l'assoliment d'aquest objectiu es procedirà a l'ús d'una funció específica de mallat. Aquesta funció s'anomena "inflation" i permet intensificar el mallat en la regió desitjada. Per a aquesta intensificació, s'optarà per usar elements quadràtics que garanteixen una bona simetria i una bona adaptació a la geometria de la cambra. Aquesta nou mallat es pot observar en les figures 9.2.2.9 i 9.2.2.10 a continuació.

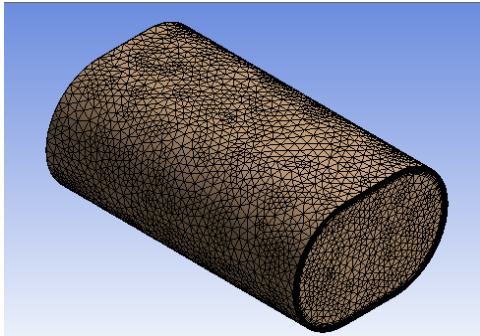


Figura 9.2.2.9 Mallat III

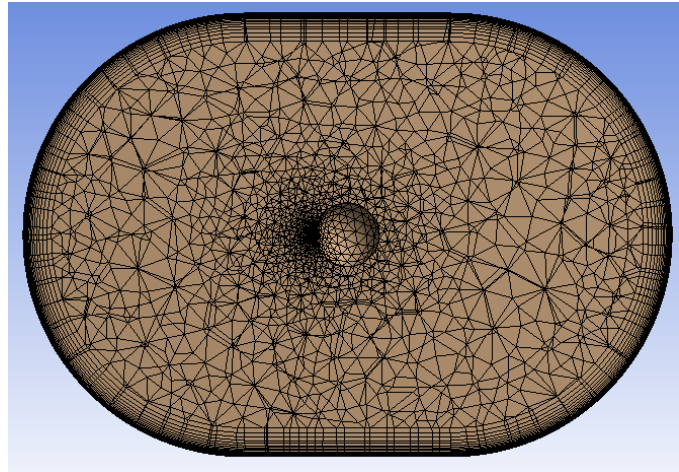


Figura 9.2.2.10 Tall de secció transversal III

Per a obtenir el refinament desitjat ha estat necessari dir-li al programa que es vol intensificar el mallat de la geometria sencera respecte la superfície de la cambra. Juntament amb aquesta informació, ha calgut especificar el nombre de capes intensificades i el gruix d'aquestes. És per aquest motiu que l'eina "inflation" és de molt gran utilitat (veure figura 9.2.2.11).

En aquest cas, amb un nombre de 20 capes d'elements de 3cm ja n'hi ha prou per el refinament que es desitja.

| Details of "Inflation" - Inflation | |
|--------------------------------------------|--------------------|
| [-] Scope | |
| Scoping Method | Geometry Selection |
| Geometry | 1 Body |
| [-] Definition | |
| Suppressed | No |
| Boundary Scoping Method | Geometry Selection |
| Boundary | 5 Faces |
| Inflation Option | Total Thickness |
| <input type="checkbox"/> Number of Layers | 20 |
| <input type="checkbox"/> Growth Rate | 1,2 |
| <input type="checkbox"/> Maximum Thickness | 3,e-002 m |
| Inflation Algorithm | Pre |

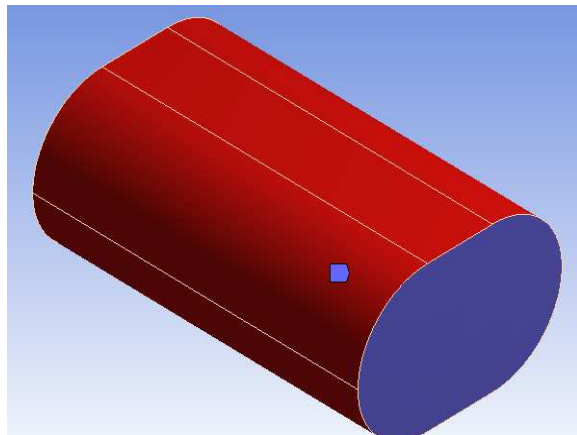


Figura 9.2.2.11 Detalls de l'operació "inflation"

Un cop creat el nou mallat, a continuació es discuteix la precisió dels resultats obtinguts (veure *figura 9.2.2.12*).

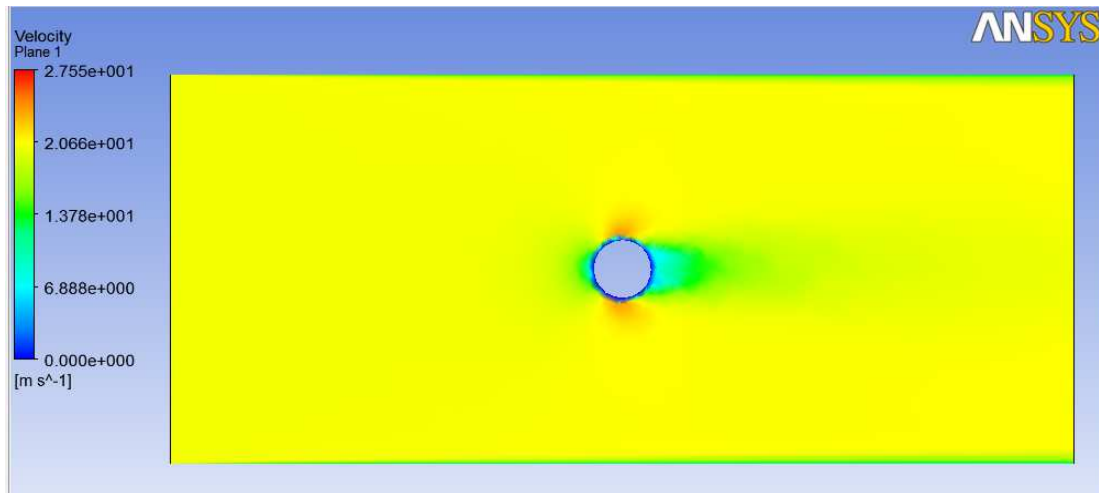


Figura 9.2.2.12 Resultats III

Gràcies al refinament produït a l'intensificar els elements en les proximitats de la cambra d'assaig, ara sí que s'obté una gran millora respecte els antics mallats. Com que no s'ha variat el mallat interior, els resultats de les zones pròximes a la maqueta segueixen sent iguals als del mallat II. Ara bé, com s'observa a la part inferior i superior de la figura, ara sí que s'ha obtingut una alta precisió de la capa límit al llarg de la direcció del flux i, a més, aquesta és simètrica respecte aquesta direcció.

- Quart mallat

En un principi es pensava que el mallat definitiu havia de ser el mallat III degut als bons resultats obtinguts tant a la superfície interior del túnel com als voltants de la maqueta. Bé doncs, posteriorment, alhora de estudiar el perfil de velocitat a la capa límit es va veure com els resultats podien ser molt millors, ja que divergien molt de la informació teòrica. És per aquest motiu pel qual es va decidir millorar el mallat III tot refinant el mallat al voltant de les maquetes. Per a aquesta millora, es va realitzar una altra “inflation”, però en aquest cas la intensificació es centrava en les proximitats de la maqueta.

Com que l'objectiu de millorar el mallat a les parets del túnel era veure que la capa límit produïda no afectés a la maqueta, un cop vist que això no passa tal i com s'observa en els mallats anteriors, s'ha optat per eliminar la intensificació en aquest mallat. D'aquesta manera es disminueix el temps de càlcul del computador.

Així doncs, el mallat IV es caracteritzarà especialment per tenir una zona amb una gran concentració d'elements a la proximitat de la maqueta. Aquest nou mallat es pot observar en les *figures 9.2.2.13 i 9.2.2.14* a continuació.

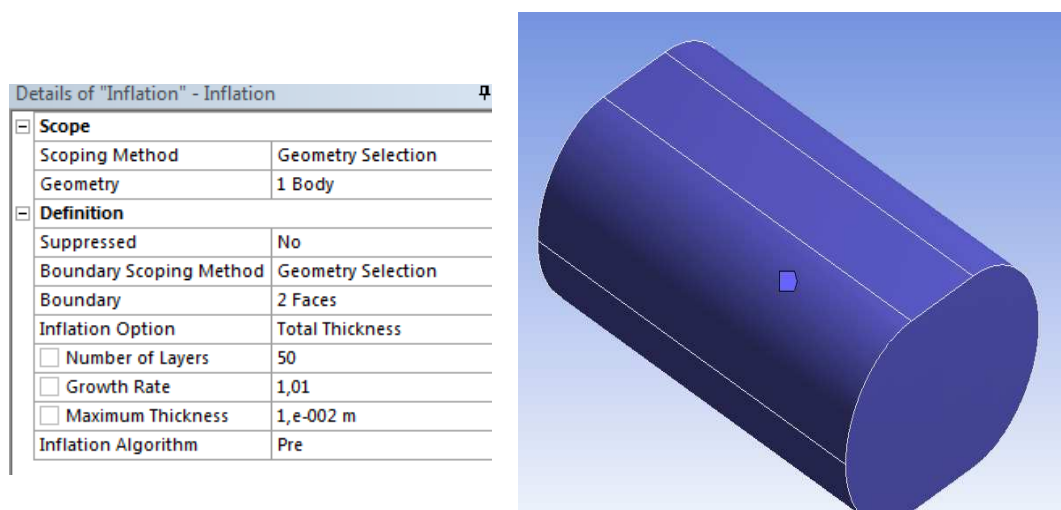


Figura 9.2.2.13 Detalls de l'operació “inflation” II

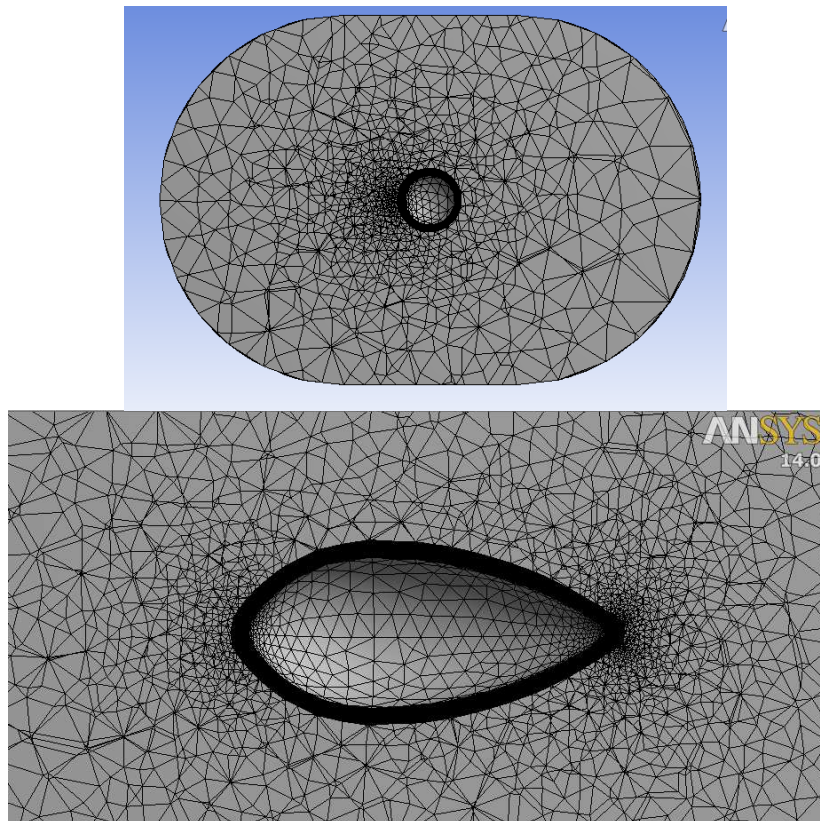


Figura 9.2.2.14 Tall de secció transversal IV

Un cop realitzat el mallat es va procedir a analitzar la zona de més importància i es va veure com, ara sí, el resultat era excel·lent. Això es pot apreciar a la *figura 9.2.2.15* tot seguit:

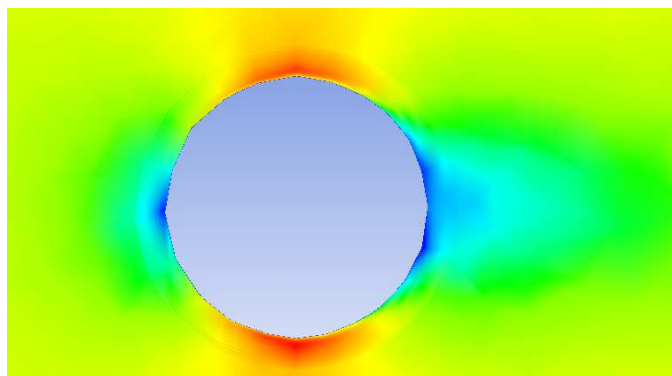


Figura 9.2.2.15 Resultats IV

Per la bona precisió obtinguda en les proximitats de la maqueta, el mallat amb el que s'ha decidit treballar és el mallat IV.

- Cinquè mallat

El quart mallat va ser útil fins que va tocar realitzar les dos simulacions amb la peça cilíndrica. Aquest mallat era molt bo per peces que tenien un deixant molt petit i proper al cos. D'aquesta manera l'operació "inflation" realitzada era suficient per cobrir el deixant. Així doncs, es va haver d'engrandir la inflació i fer que cobrís les parts on el deixant estava més allunyat del cos. D'aquesta manera es van obtenir millors resultats que en el quart mallat, on una part important del deixant quedava cobert per un mallat més bast.

Malgrat tot, l'ordinador tenia unes limitacions i no va ser capaç de cobrir tot el deixant degut a la gran complexitat del mallat i les simulacions van ser avortades.

Així doncs, el mallat realitzat per les peça cilíndrica és el corresponent a les figures 9.2.2.16 i 9.2.2.17 mostrades a continuació.

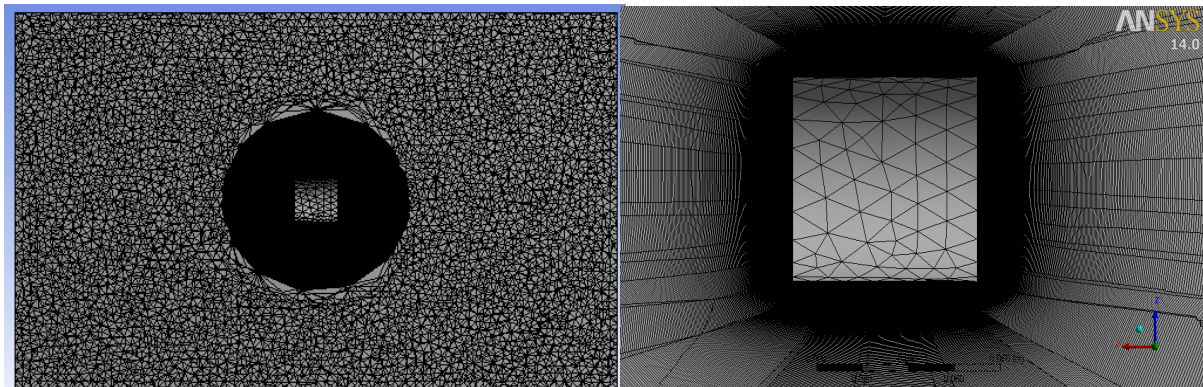


Figura 9.2.2.16 Tall de secció transversal V

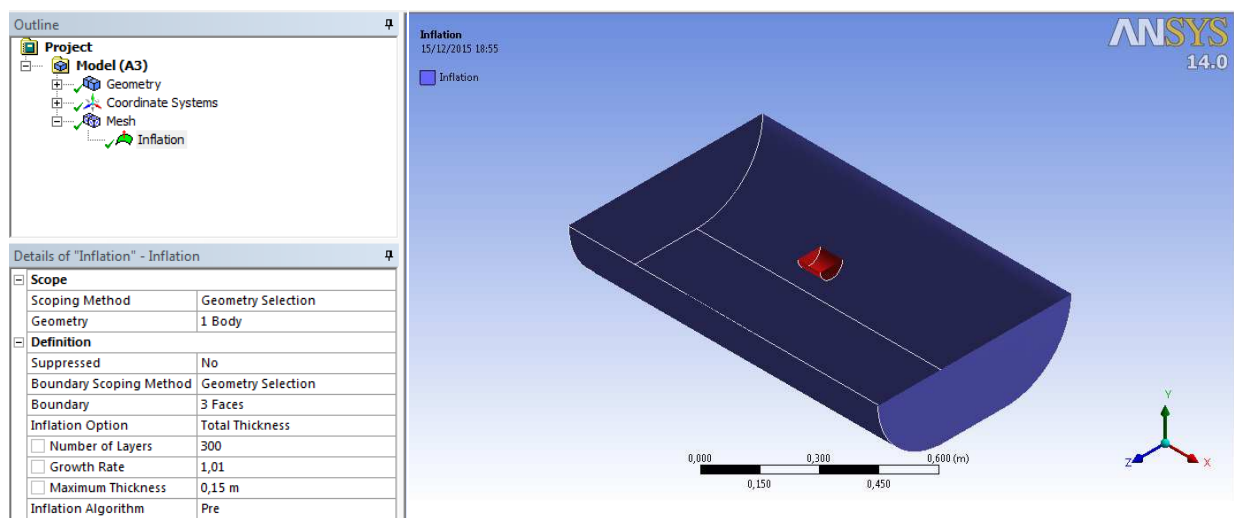


Figura 9.2.2.17 Detalls de l'operació "inflation" III

9.2.3. Configuració (Setup)

En el Setup s'introdueixen les condicions de contorn juntament amb les característiques del flux. Així, es pot realitzar un seguiment de les variables que es desitgi estudiar. A continuació s'analitza aquesta opció amb detall.

Tan bon punt es clica l'opció Setup, es visualitza la geometria creada juntament amb l'arbre d'operacions.

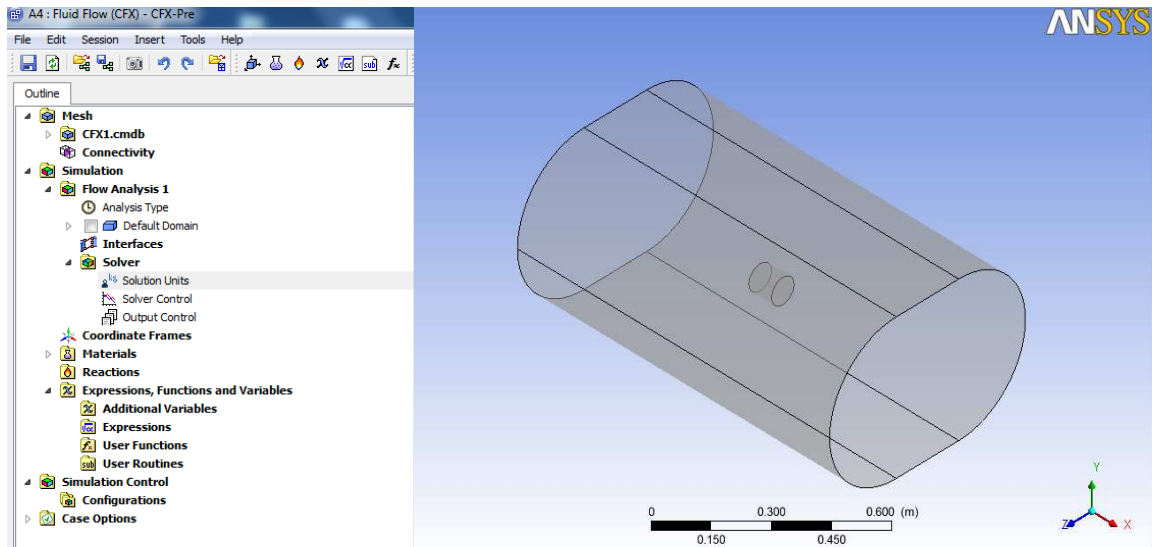


Figura 9.2.3.1 Setup

Ara el que cal fer primer de tot és introduir el tipus de fluid i la seva temperatura, la pressió de referència i el model de turbulència entre altres opcions. El fluid utilitzat és l'aire a 25°C. Pel que fa al model de turbulència, aquest serà el Shear Stress Transport ja que és el que ofereix millors resultats i és una barreja dels altres models (k-e i k-w).

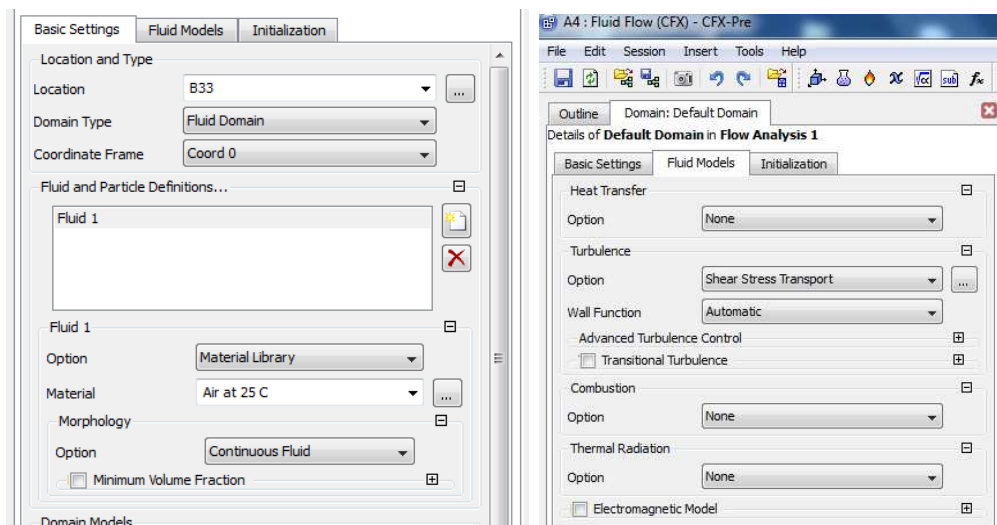


Figura 9.2.3.2 Setup-Default Domain

Un cop introduït el fluid d'estudi, ja es pot procedir a aplicar les condicions de contorn. Per introduir aquestes condicions s'han de crear cadascun dels dominis necessaris prèviament. En aquest cas, els dominis necessaris seran: l'entrada (inlet), la sortida (outlet), la paret de la cambra (chamber) i el cos d'estudi (wall).

En l'entrada caldrà dir-li la velocitat a la que entra el fluid. Caldrà anar-la canviant cada cop que es vulgui començar una altra simulació a diferent velocitat.

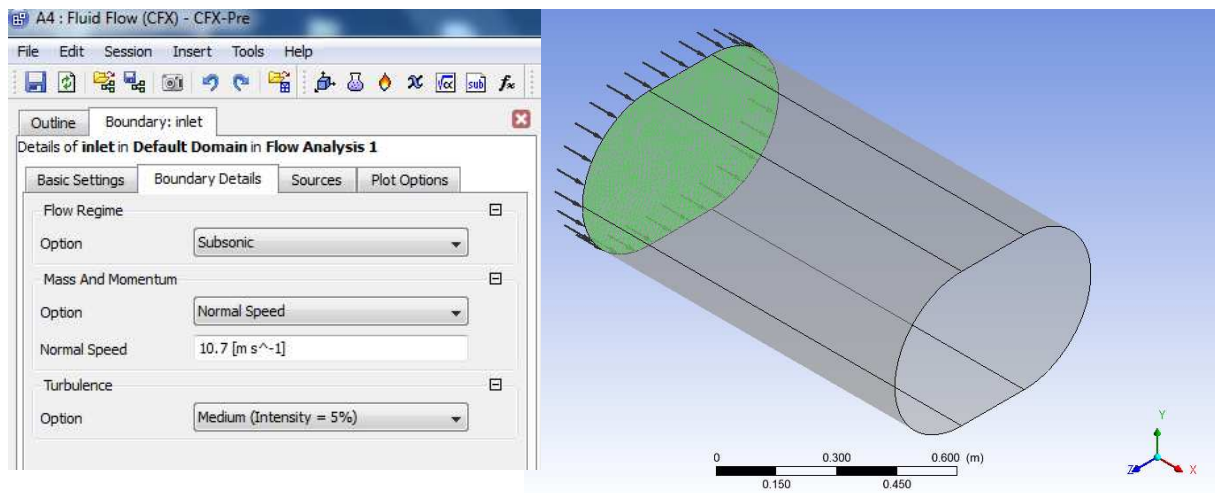


Figura 9.2.3.3 Inlet

A la sortida caldrà indicar-li quina és la pressió relativa. Aquesta serà de 0 Pa.

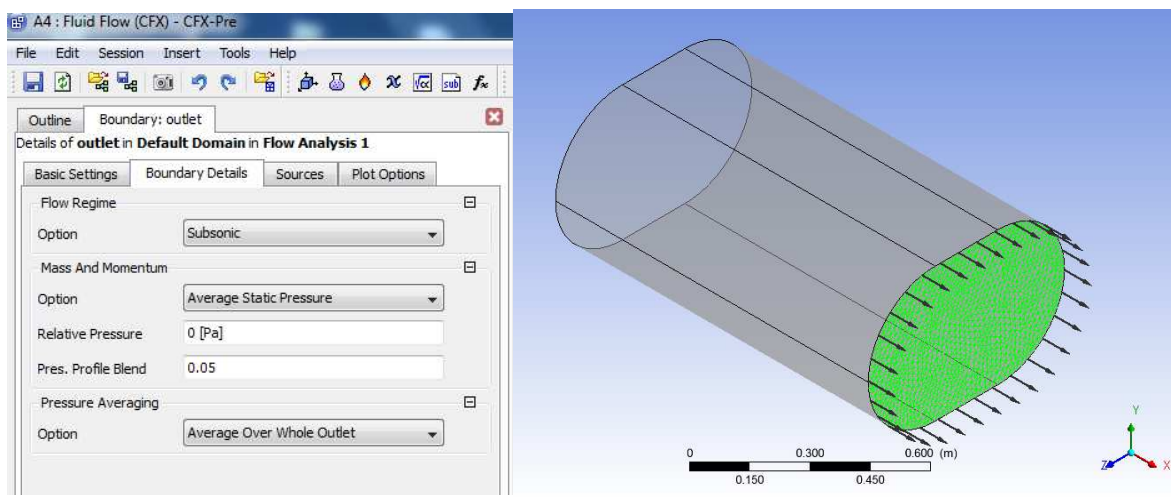


Figura 9.2.3.4 Outlet

I per últim cal definir-li les parets del sistema. Caldrà separar les parets de la cambra de les parets del cos degut al posterior anàlisi que es realitzarà. En les parets, es definirà l'opció de condició de no lliscament i, gràcies a això, es tindrà velocitat zero a les parets.

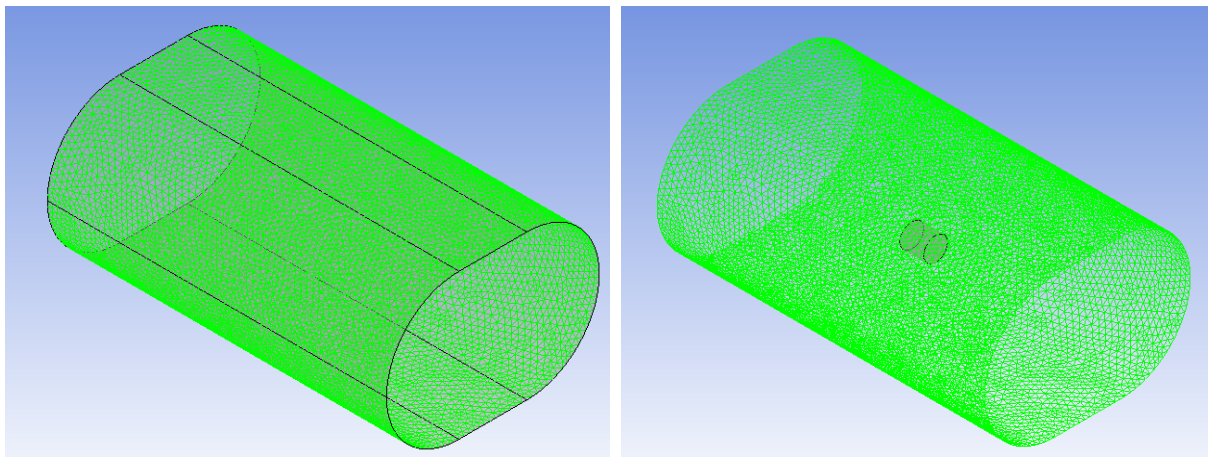
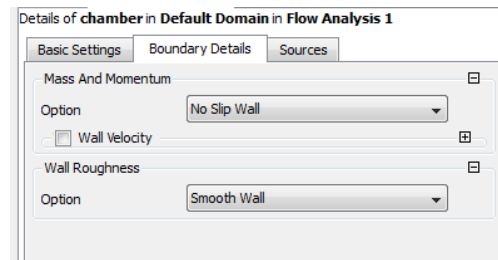


Figura 9.2.3.5 Chamber i Wall

Per acabar, un cop definits els dominis i les condicions de contorn caldrà definir els residus i el nombre màxim d'iteracions en la simulació.

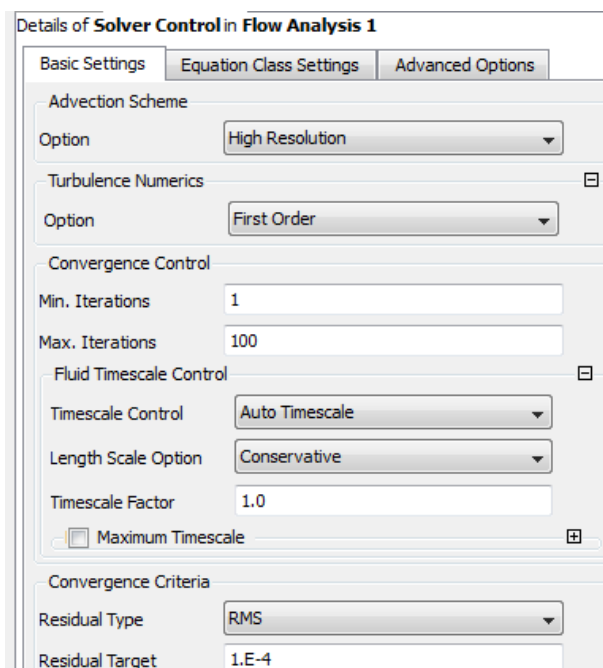


Figura 9.2.3.6 Solver Control

Així doncs, ja estarien introduïdes totes les condicions necessàries per al Setup i ja es podria passar a la següent opció.

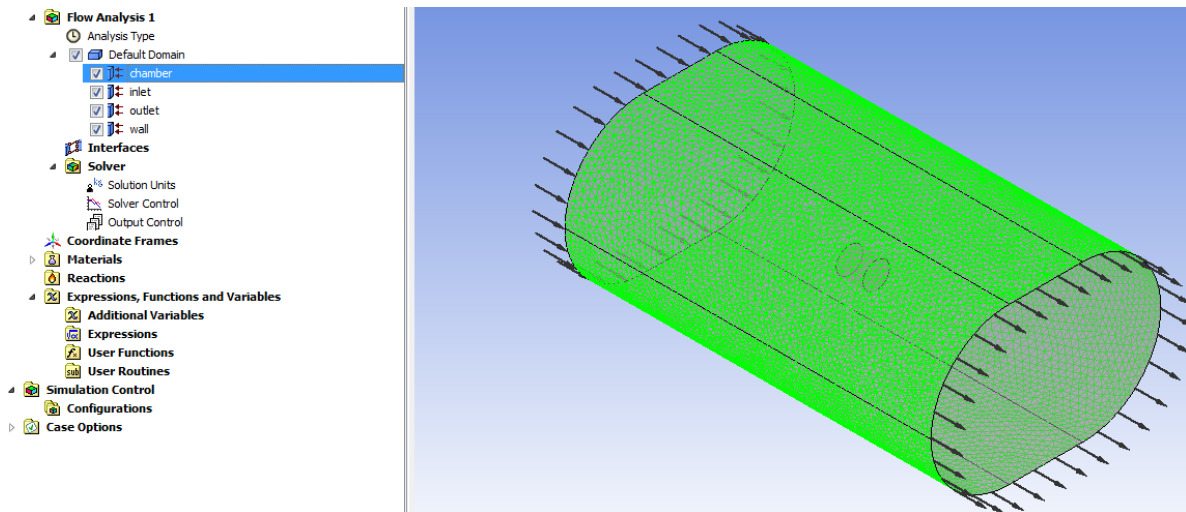


Figura 9.2.3.7 Setup complet

9.2.4. Solució (Solution)

En aquesta operació es duen a terme els càlculs de la simulació. L'objectiu d'aquest procés es comprovar que s'arriba a la convergència. Això es fa per mitjà dels residus, els quals es van mostrant a mesura que es van fent les iteracions. Com s'observa a la figura 9.2.3.6 Solver Control, en el Setup cal introduir-li el nombre màxim d'iteracions que es desitja fer, així en cas que no s'arribi al valor del residu desitjat, el programa ho acceptarà com a convergència i es podrà procedir a la següent operació. Els residus (Residual Target) fan referència a les diferències de les mesures entre iteracions. D'aquesta manera, quan les diferències entre iteracions superin les desitjades (0,0001) el solucionador s'aturarà amb èxit.

A més, el solucionador permet visualitzar els residuals instantàniament en forma de gràfic. Aquest gràfic correspon al de la figura 9.2.4.1 Solution.

En el gràfic de la figura es mostra la convergència basada en la mitjana residual de tots els volums de control (RMS) per les equacions que el solucionador realitza (conservació de la massa i els moments en els tres eixos).

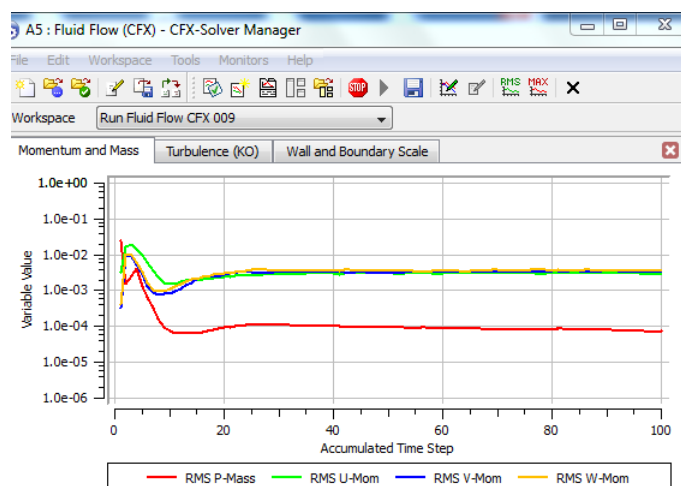


Figura 9.2.4.1 Solution

9.2.5. Resultats (Results)

L'objectiu de la simulació, un cop realitzades amb èxit totes les operacions anteriors, és obtenir una solució. Aquesta és la funció de "Results", on pots visualitzar i exportar els resultats obtinguts

A continuació es procedirà a mostrar els resultats obtinguts per cada una de les simulacions realitzades. Els resultats obtinguts en la simulació són principalment els gràfics de Cd en front del Reynols. Aquests gràfics, però, s'han complementat amb imatges on es mostra clarament el deixant de cadascuna de les maquetes, així com la velocitat del fluid al voltant d'aquestes.

9.2.5.1. Simulació del cilindre amb incidència frontal

Primerament, es va voler mostrar el valor de les velocitats al voltant de la maqueta. Per a això, es va crear un pla perpendicular a la planta i en la direcció del fluid passant just pel centre de la maqueta i es va mostrar la velocitat en cadascun dels punts d'aquest pla.

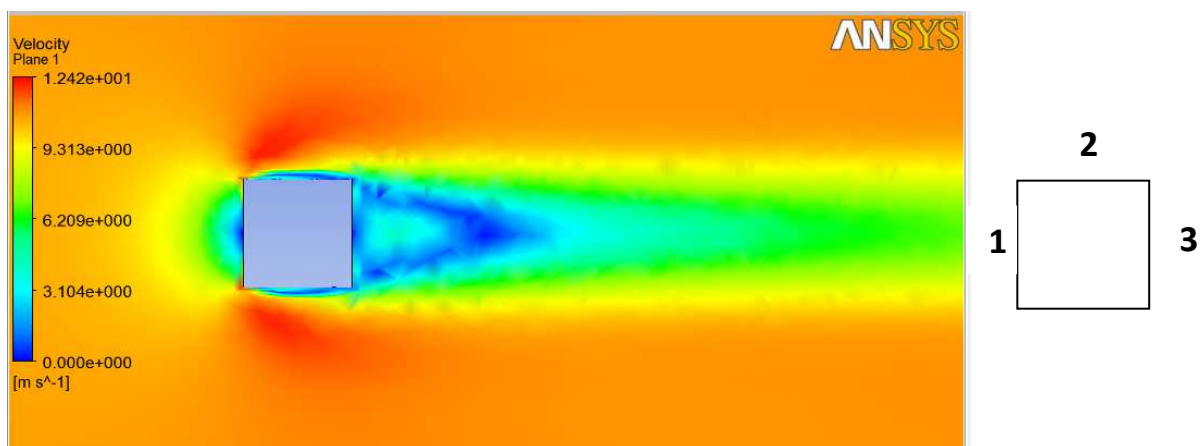


Figura 9.2.5.1.1 Pla de velocitats

L'objectiu d'aquesta imatge és visualitzar factors de gran importància com són el punt d'estancament, el deixant o el gruix de la capa límit. Primerament, com era d'esperar degut a la seva geometria, el punt d'estancament (cara 1) es significatiu comparat amb les altres maquetes. En aquest gràfic, en taronja es mostra la velocitat a la que es realitza la simulació (aquesta en concret era de 10m/s). Degut a la topada del fluid amb una secció perpendicular a aquest, es veu com es perd molta velocitat en aquesta regió. A més, degut al canvi brusc (perpendicular) de geometria (pas de cara 1 a 2), les línies de corrent no poden seguir el contorn de la peça i en el moment d'accelerar-se el fluid, aquest es separa lleugerament de la peça.

Un altre fet que es veu a primera vista és la gran grandària del deixant. Com que la part final de la peça presenta un canvi perpendicular de secció (de 2 a 3), les línies de corrent no s'adapten al cos degut a l'energia cinètica que posseeix el fluid. És per això que el fluid es desaccelera tot generant-se un gradient de pressió positiu (desfavorable) donant pas al deixant. Com ja s'ha comentat amb anterioritat, el deixant es caracteritza per ser una zona on es genera una recirculació del fluid. Per visualitzar això, amb el mateix pla anterior es van mostrar els vectors de les línies de corrent tot centrant-se en el deixant.

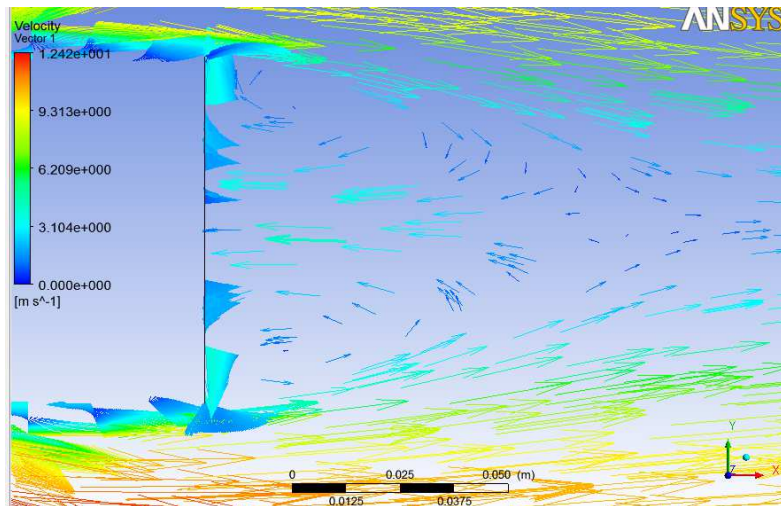


Figura 9.2.5.1.2 Vector de velocitats I

Com s'observa, apareixen unes fletxes que apunten cap a l'esquerra, tot dirigint-se un altre cop cap al cos. Aquesta zona de naturalesa turbulenta és el que s'anomena deixant (zona 3).

En aquest cas no té massa sentit obtenir el gruix de la capa límit ja que degut al gran punt d'estancament que s'obté, aquesta no es genera inicialment. Aquest fet es pot veure clarament en la següent figura, on degut al canvi brusc de 1 a 2 es produeix un fet semblant al pas de 2 a 3 i es genera un deixant en la cara 2 tot impedit que les línies de corrent s'adaptin a aquesta cara.

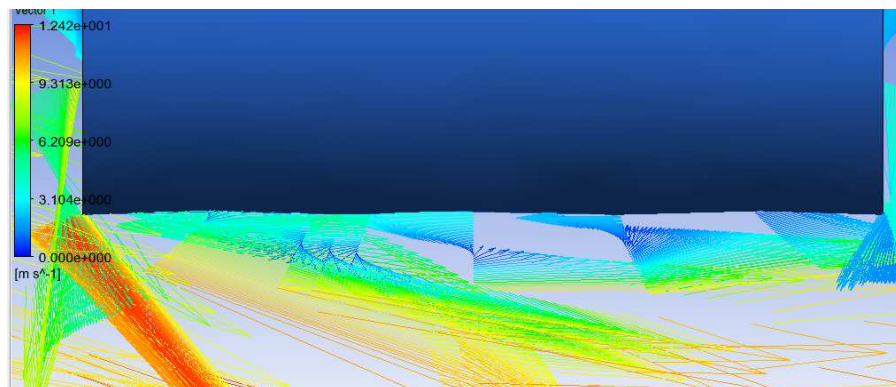
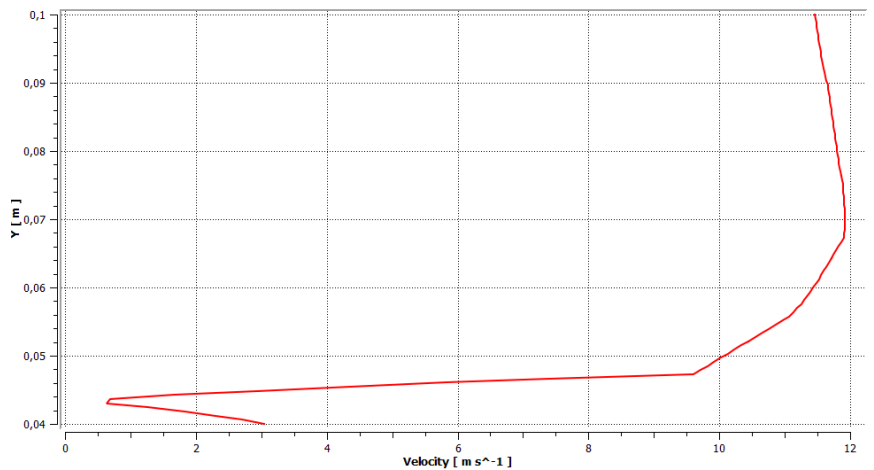


Figura 9.2.5.1.3 Vector de velocitats II: deixant

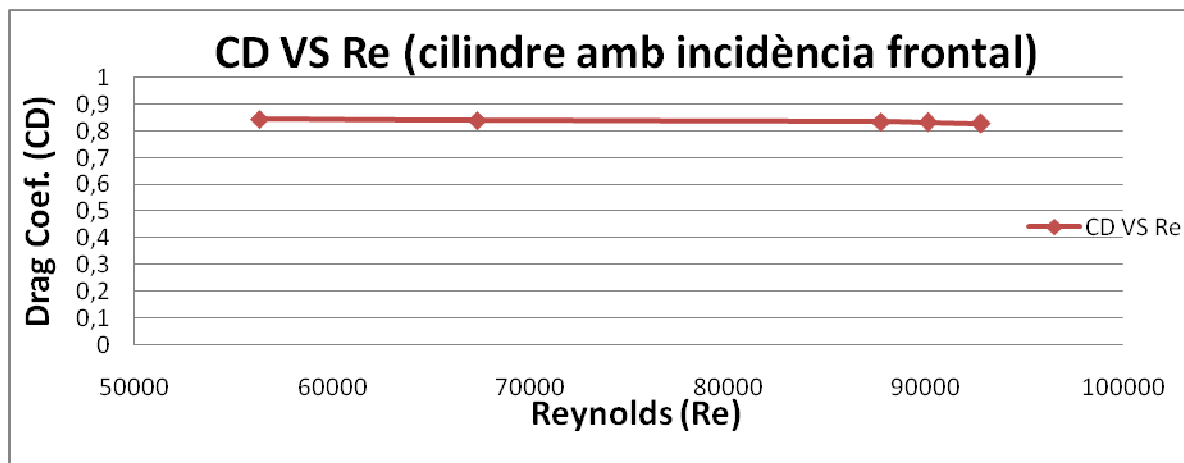
Aquest fet també es pot mostrar visualitzant el perfil de velocitats del fluid en una part qualsevol de la cara 2. Per a això, es va crear una línia perpendicular a aquesta cara, en la direcció y i just en el punt mig de la cara, i es va mostrar la velocitat al llarg de la línia. Comentar que l'origen de la línia correspon al punt mig de la cara 2, que està a 4 cm de l'origen de coordenades (centre de la maqueta).



Gràfic 9.2.5.1.1 Perfil de velocitats

D'aquesta manera, també es pot veure com en el tram 2 es produeix una prèvia disminució de la velocitat a causa de l'augment de pressió generat pel deixant.

Per últim, un cop analitzats aquests elements, el programa va calcular la força de resistència total i amb aquest valor es va poder obtenir i gràficar posteriorment el Cd en front del nombre de Reynolds.



Gràfic 9.2.5.1.2 CD(Re) en el cilindre amb incidència frontal

Aquest ha estat el procediment emprat per cadascuna de les simulacions per tant, d'ara endavant s'ometrà l'explicació del procediment i s'inclourà només l'anàlisi dels resultats.

9.2.5.2. Simulació del cos fusiforme

En aquest cas, el punt d'estancament (1) es redueix moltíssim degut a la suavitat de geometria inicial. Com es veu a la imatge, el cas és completament diferent a l'anterior on, ara, el fluid no impacta contra una paret vertical de manera que la pèrdua de velocitat afecta a una regió més petita.

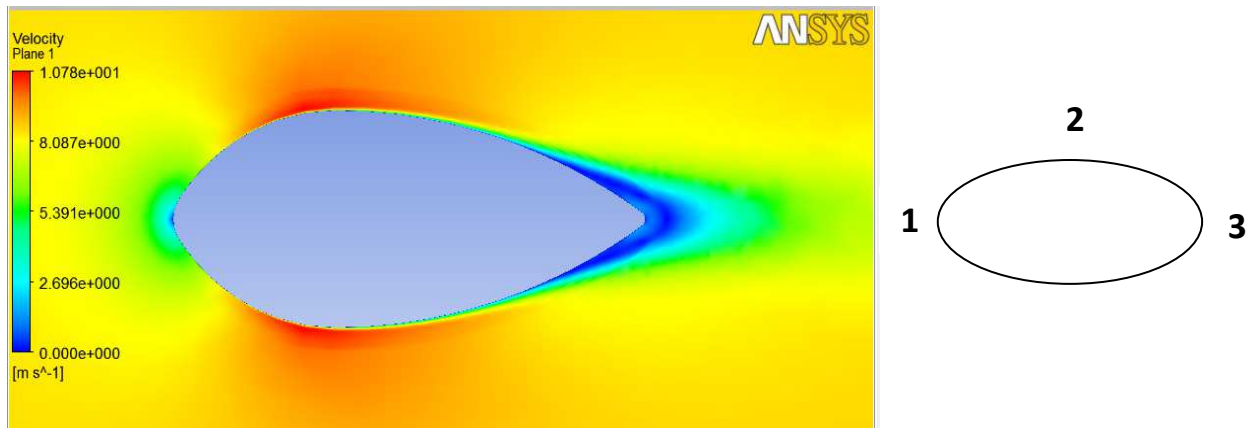


Figura 9.2.5.2.1 Pla de velocitats

Una altra diferència significativa amb el cas anterior és el deixant. Com que la part final de la peça (zona 3) també posseeix canvis de geometria suaus el deixant és molt menor. Malgrat disposar de canvis suaus de geometria, a mesura que el fluid s'acosta al final del cos el gradient de pressió va augmentant fins que la capa límit es desprèn, és llavors quan es comença a generar el deixant.

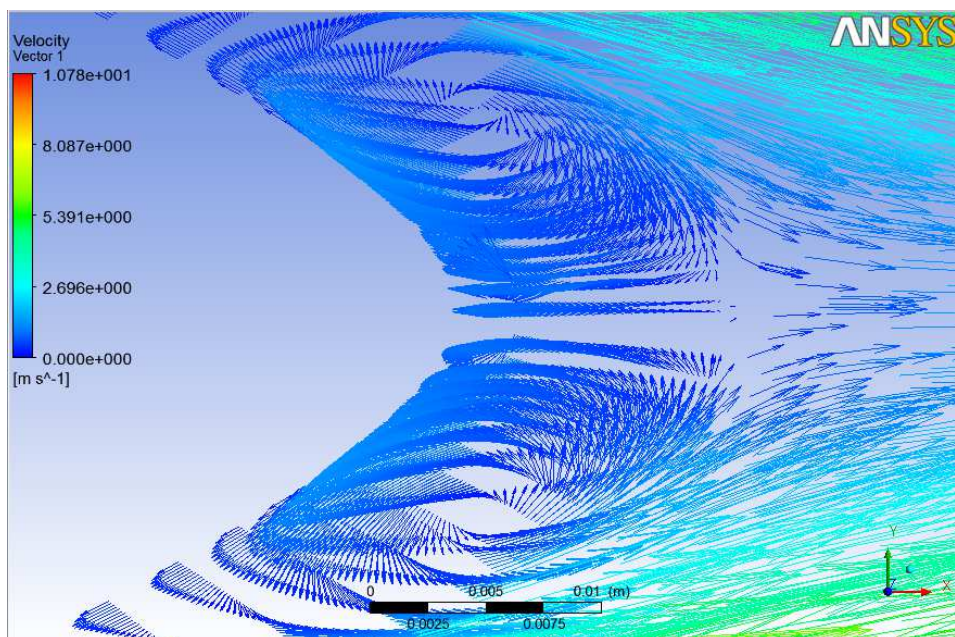
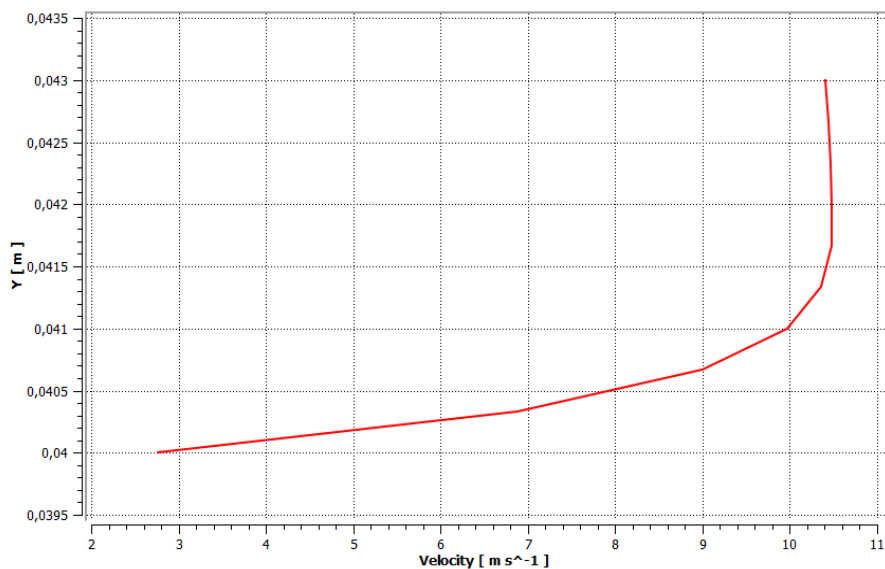


Figura 9.2.5.1.2 Vector de velocitats: deixant

Pel que fa a la transició de 1 a 2, a causa de la geometria de grans radis que té la peça, al fluid li és més senzill adaptar-se al contorn del cos des d'un bon principi i permet que aquest es vagi accelerant fins arribar al punt de màxima velocitat (regió vermella a la figura 9.2.5.2.1). Com que ara no es produeix cap deixant en aquesta part, les línies de corrent s'adapten perfectament a la superfície i ara sí que es produeix la capa límit. Per tant, ara ja tindrà més sentit comprovar el gruix de la capa límit mitjançant el procediment de l'apartat anterior.

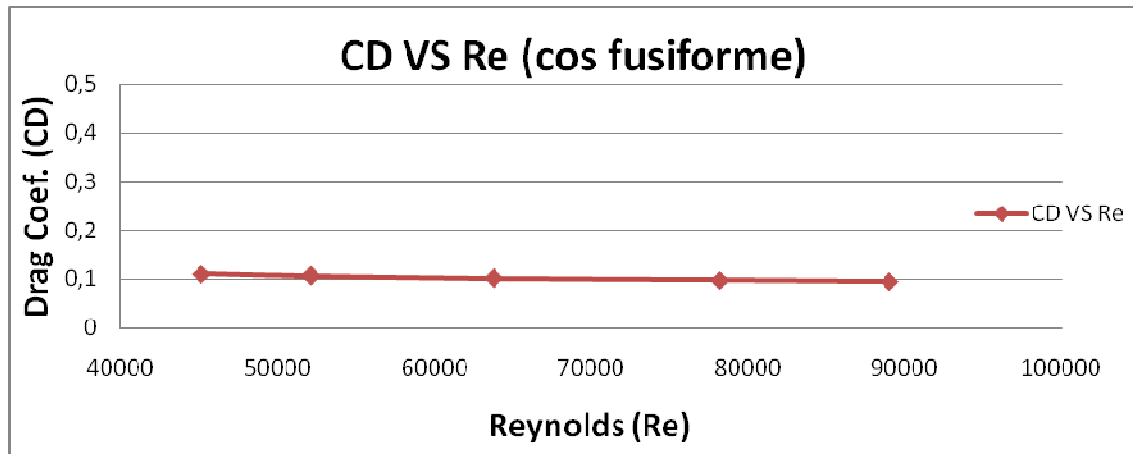
Ara, el centre de coordenades està situat a la meitat de la línia vertical que uneix els punts d'alçada màxima (l'inferior i el superior). A més, la línia vertical utilitzada per trobar el perfil de velocitats també comença en el punt d'alçada màxima de la maqueta, estan aquest a 4 cm de l'origen.



Gràfic 9.2.5.2.1 Perfil de velocitats

En el gràfic es pot apreciar com la capa límit, en el punt d'alçada màxima, està compresa des de 0,04 fins a 0,042 cm, punt on la velocitat comença a disminuir. A partir d'aquest punt, la velocitat comença a disminuir a mesura que la distància vertical augmenta. D'aquesta manera l'aire acabarà assolint la velocitat estacionària corresponent a la velocitat inicial (regió groga del Pla de velocitats, aproximadament de 8,6 m/s).

De la mateixa manera que en la simulació anterior, es torna a calcular la força de resistència obtinguda per així graficar el C_d segons el nombre de Reynolds.



Gràfic 9.2.5.2.2 $C_D(Re)$ en el cos fusiforme

9.2.5.3. Simulació de l'el·lipsoide

Aquest és un cas molt semblant al del cos fusiforme. Les dos geometries són molt semblants però aquesta té radis més tancats. És per això que el punt d'estancament (1) és lleugerament més gran i el deixant (3) és major a causa de la menor suavitat en els canvis sobtats de geometria.

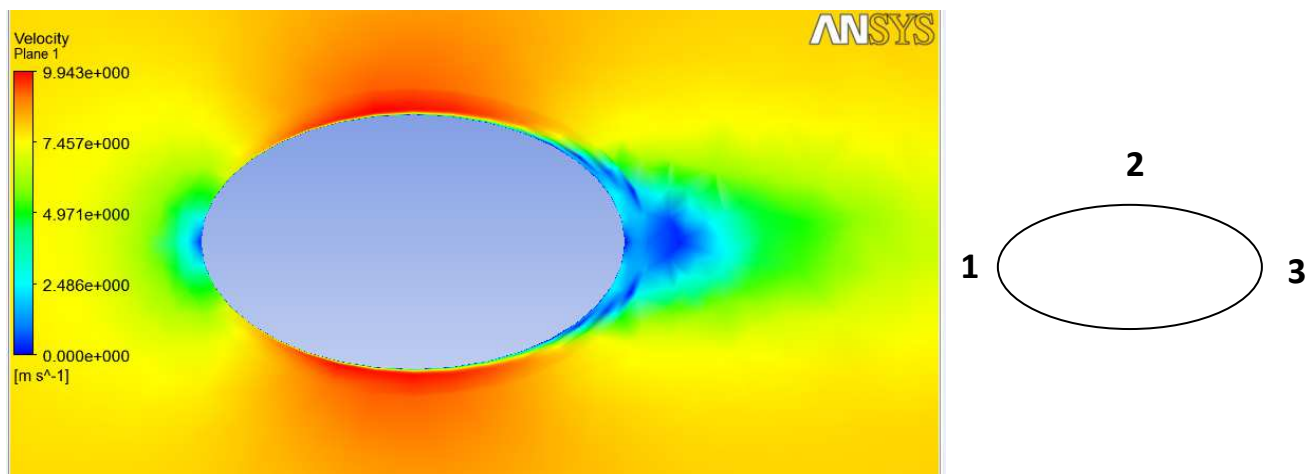


Figura 9.2.5.3.1 Pla de velocitats

Malgrat que es generi un deixant major, el desprendiment de la capa límit es produeix més tard. Això passa perquè el canvi brusc de radi es produeix molt cap al final de la peça i, fins llavors el gradient de pressió no es prou desfavorable per a que la capa límit es desprengui.

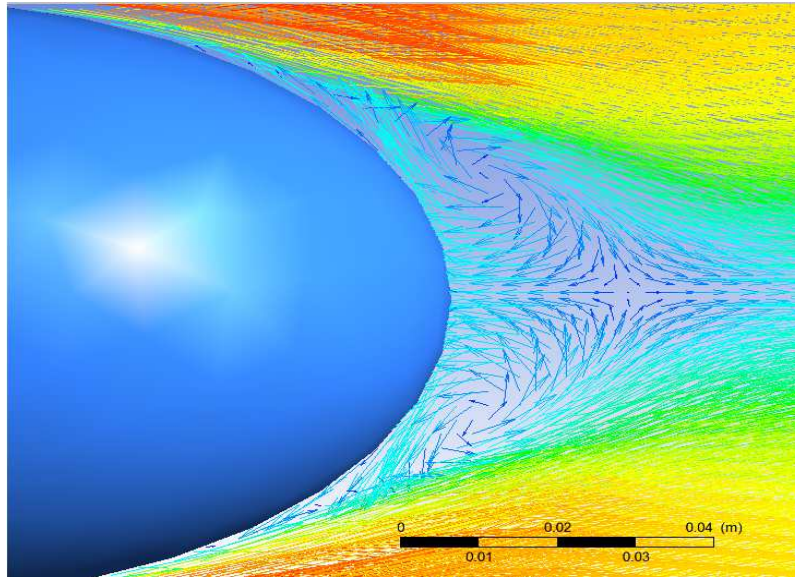
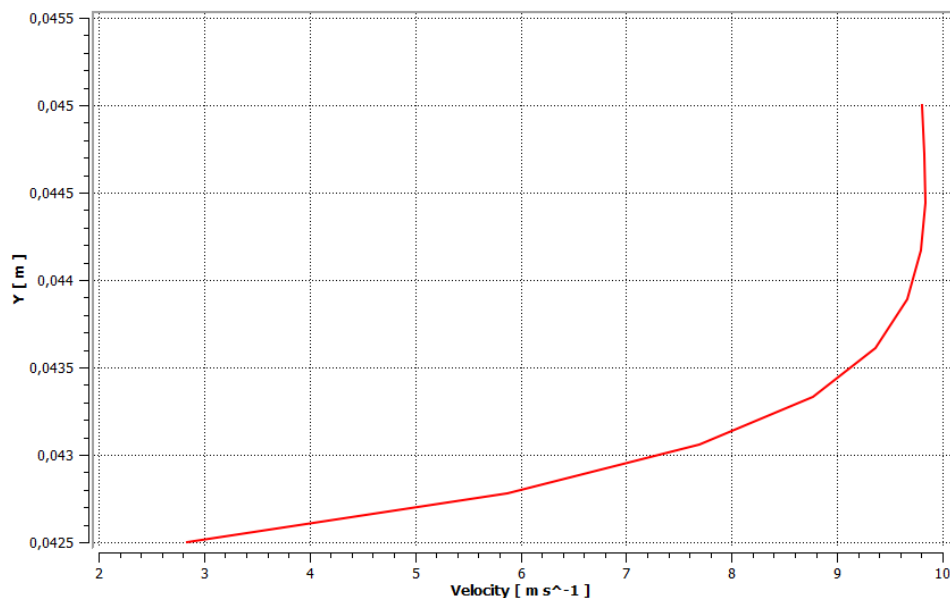


Figura 9.2.5.3.2 Vector de velocitats: deixant

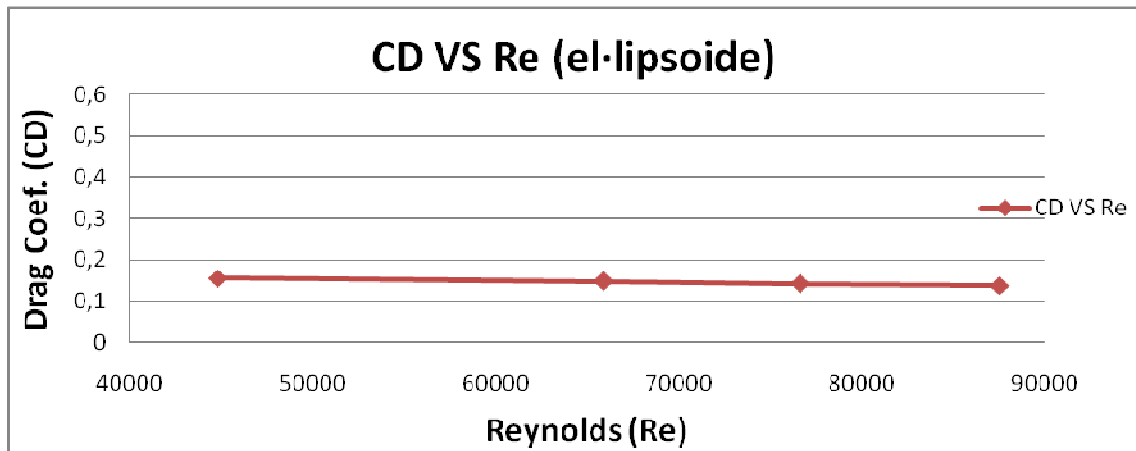
El centre de coordenades està situat, de la mateixa manera que en el cos fusiforme, a la meitat de la línia vertical que uneix els punts d'alçada màxima (l'inferior i el superior). Igualment, la línia vertical utilitzada per trobar el perfil de velocitats també comença en el punt d'alçada màxima de la maqueta, estan aquest a 4,25 cm de l'origen.



Gràfic 9.2.5.3.1 Perfil de velocitats

En aquesta simulació, la capa límit està continguda en l'interval vertical de 0,0425 i 0,0445 m donant casualment un gruix de 0,002 m igual que al del cos fusiforme en el punt de màxima alçada.

Un cop més, gràcies a l'obtenció de la força de fricció total generada, es pot graficar la funció $C_d(Re)$.



Gràfic 9.2.5.3.2 $C_d(Re)$ en l'el·lipsoide

9.2.5.4. Simulació de l'esfera

El cas de l'esfera es pot assimilar al de l'el·lipsoide. Tal i com es pot apreciar en les dos figures dels seus respectius plans de velocitat, la zona 1 i 3 corresponents al punt d'incidència i a l'el deixant són molt semblants. La única diferència és que degut a la geometria que té l'esfera, el flux no disposa de tanta distància per accelerar-se i el gradient de pressió desfavorable es produeix abans.

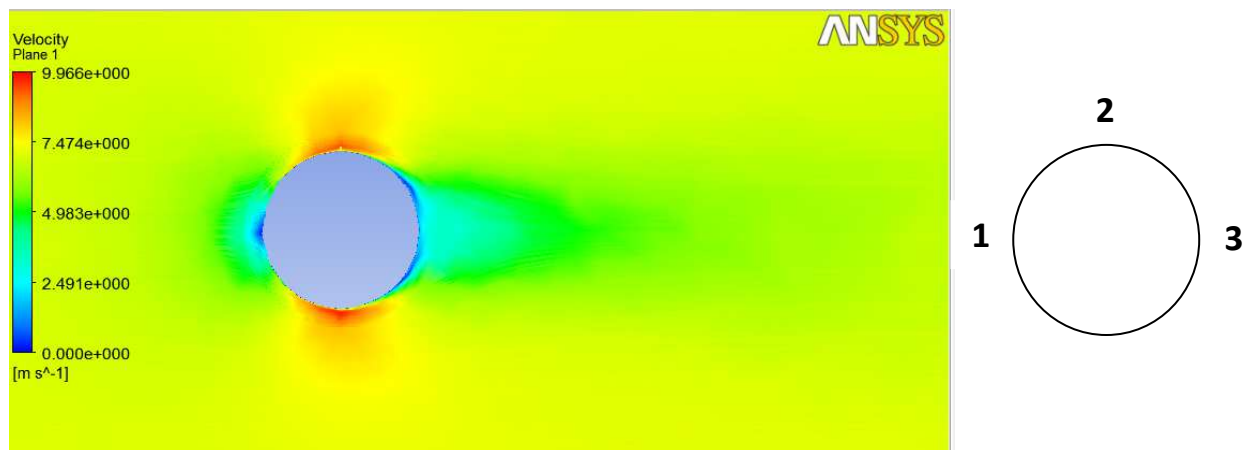


Figura 9.2.5.4.1 Pla de velocitats

Analitzant la zona 2 i el tram del deixant (3), es veu com la capa límit es desprèn poc després d'haver superat el punt de màxima velocitat, sent aquest punt el de màxima alçada de l'esfera. Ara, el desprendiment de la capa límit no es produeix degut al canvi brusc de geometria, ja que aquesta maqueta disposa de total simetria amb un radi sempre constant. Aquest radi, però, no és prou suau com ho és per exemple el del tram 2 de l'el·lipsoide. És per això que quan el flux es comença a desaccelerar, les línies de corrent d'aquest no es poden ajustar a el contorn de l'esfera i se'n separen.

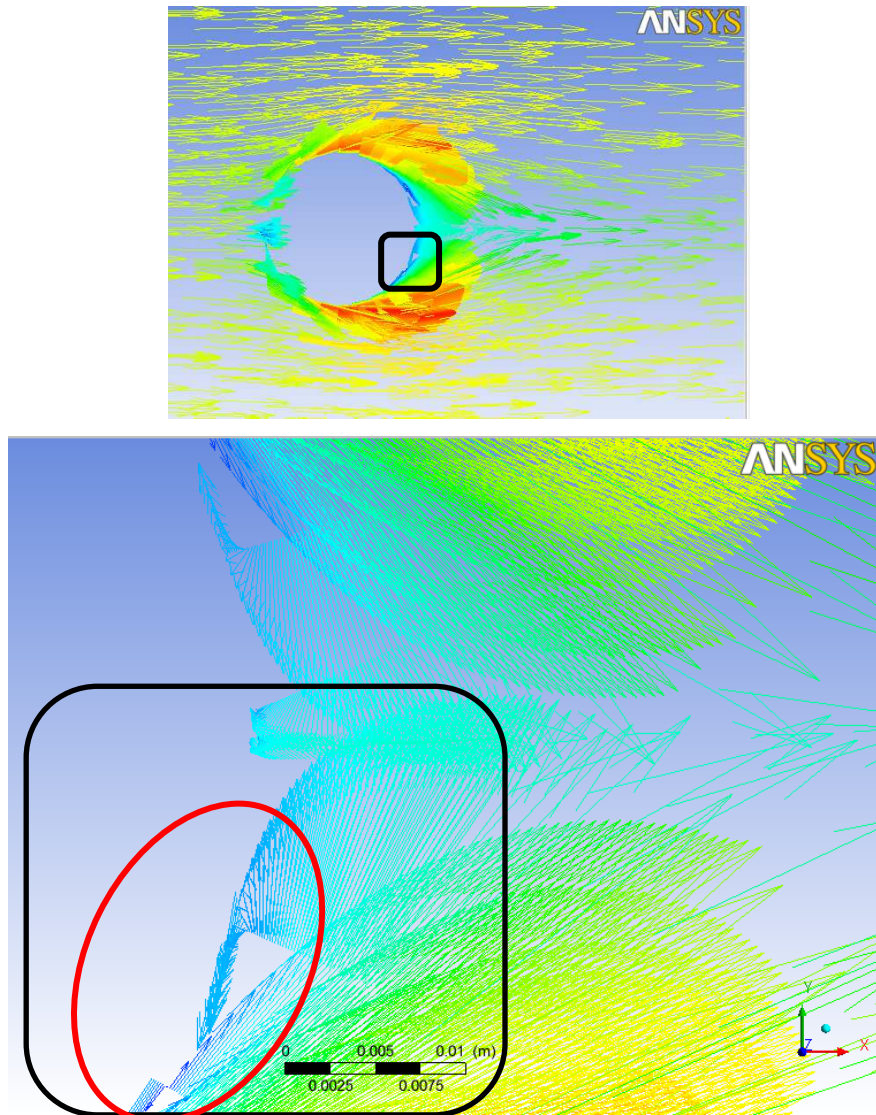


Figura 9.2.5.4.2 Vector de velocitats

A diferència del cos fusiforme, al no disposar de radis grans que aportin suavitat a la part posterior del cos es produeix un gran deixant similar al de totes les altres maquetes.

Com ja s'ha fet amb les altres simulacions, ara es procedirà a visualitzar el perfil de velocitats juntament amb el gruix de la capa límit en un lloc concret. Aquest lloc correspon, un cop més, al punt d'alçada màxima. Prenent l'origen de coordenades just al centre de l'esfera, la línia que s'ha creat comença a $y=0,035\text{m}$.

A continuació es mostra una imatge de la línia creada en aquesta simulació, a més del perfil de velocitats obtingut.

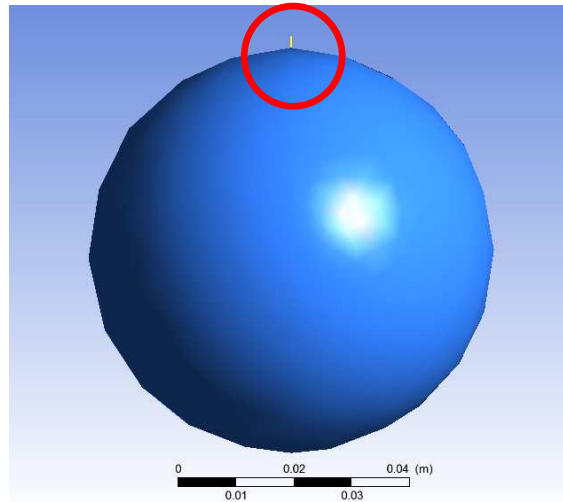
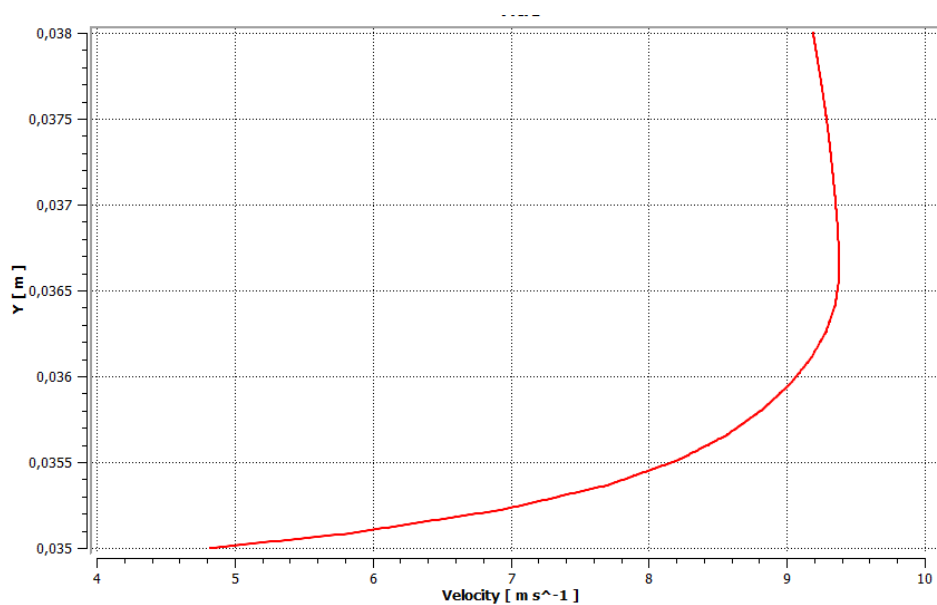


Figura 9.2.5.4.3 Línea on es calcula el perfil de velocitats



Gràfic 9.2.5.4.1 Perfil de velocitats

En aquesta simulació, la capa límit està continguda en l'interval vertical de 0,035 i 0,0367 m, punt on la velocitat comença a disminuir per assolir el valor estacionari de 7 m/s d'aquesta simulació.

Per últim, s'adjunta el gràfic del C_d en funció del Reynolds juntament amb una captura de pantalla per mostrar l'eina amb la qual l'ANSYS CFX permet obtenir el valor de la força total. En aquesta opció simplement s'ha de marcar el paràmetre que es vol calcular (força), el domini on es vol calcular (maqueta, que té el nom de wall) i el valor es mostra en el quadre de resultats.

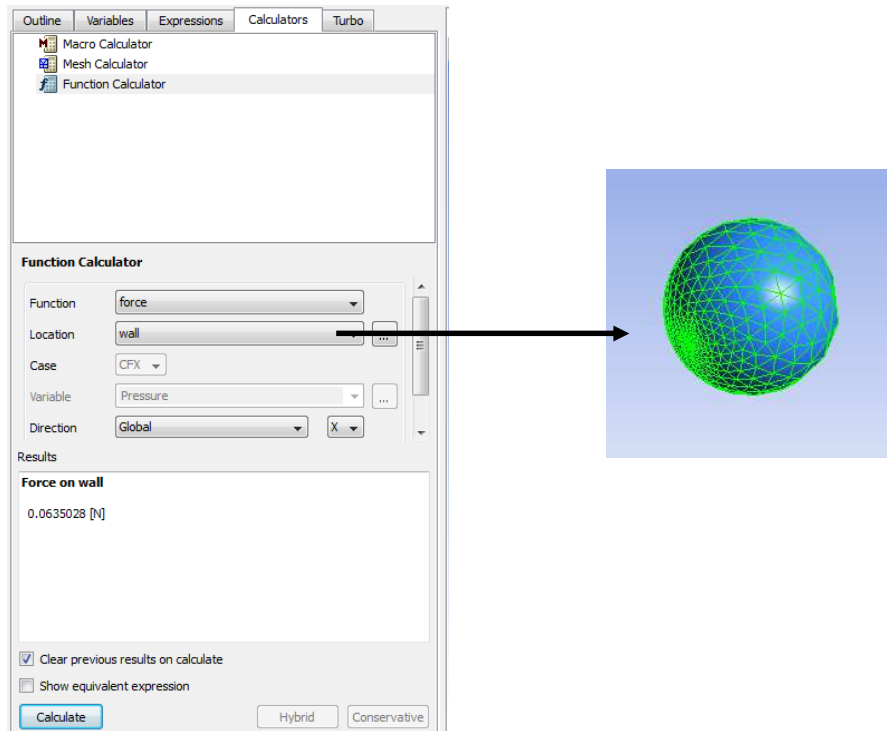
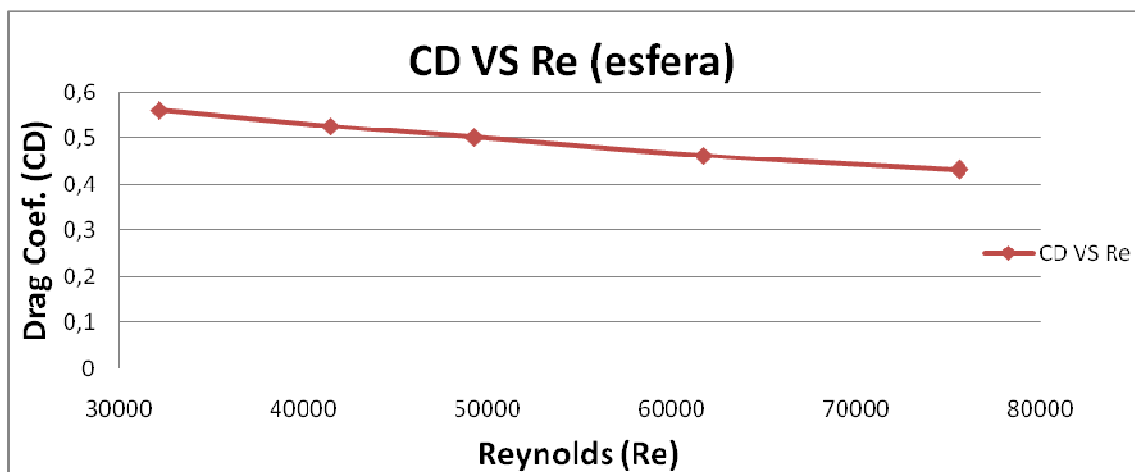


Figura 9.2.5.4.4 Càlcul de la Força



Gràfic 9.2.5.4.2 $C_d(Re)$ en l'esfera

9.2.5.5. Simulació del cilindre amb incidència lateral

Per últim s'ha realitzat la segona simulació amb la maqueta cilíndrica. Aquest cas s'assimila molt al de l'esfera ja que, vist des del pla amb el que es realitza l'anàlisi, la geometria és la mateixa. Malgrat tot, el fet de tenir una profunditat cilíndrica, fa que la zona d'estancament es concentri en una línia entrant cap al paper, enlloc d'en un únic punt com en l'esfera. Això fa que només en l'estancament es tingui un valor molt gran de força de resistència. Tot i això, aquest valor no és tant gran com en el cas on l'aire impacte contra un pla frontal (cas del cilindre amb incidència frontal).

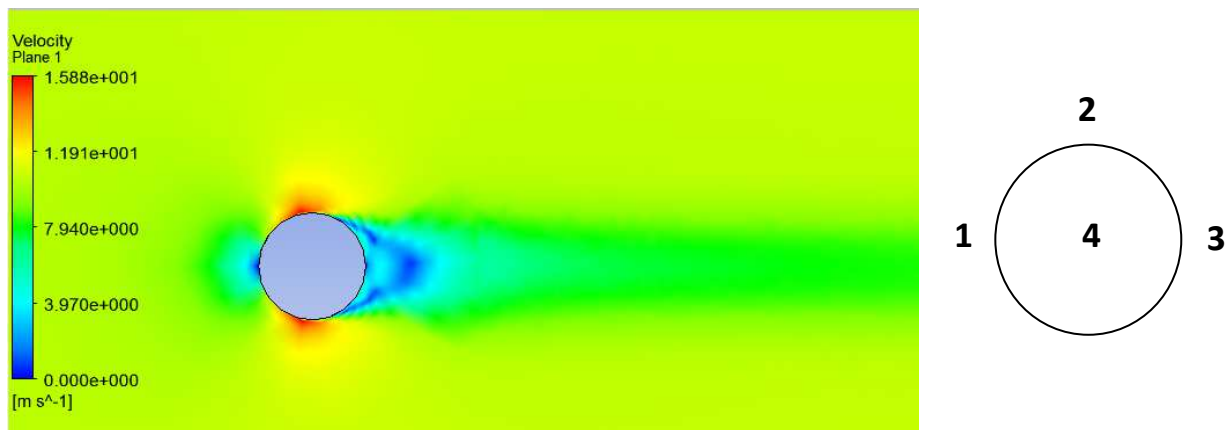


Figura 9.2.5.5.1 Pla de velocitats

Tal i com es visualitza en la imatge anterior, el deixant és el més gran de totes les simulacions realitzades. Tot i tenir la mateixa forma que l'esfera en aquest tall de secció, no cal oblidar que es tracta d'un cilindre i que té dos seccions perpendiculars als extrems. Aquest fet comporta una manca de suavitat en la geometria i que, en el pas de les línies de corrent del punt d'estancament (1) al punt 4, pertanyent a les dos cares laterals, es produeixi un deixant també a la cara 4 com en el pas d'1 a 2 en el cilindre amb incidència frontal (veure figura 9.2.5.5.2 a continuació). Això provoca una zona turbulenta que afecta directament al deixant posterior.

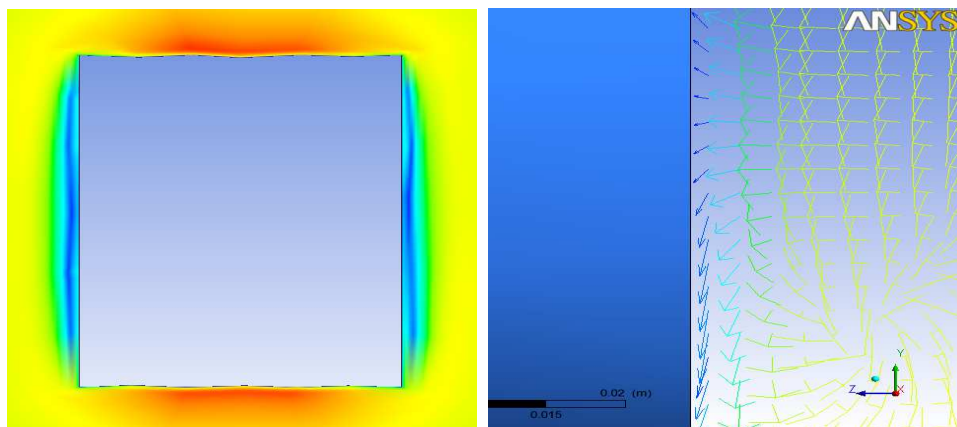
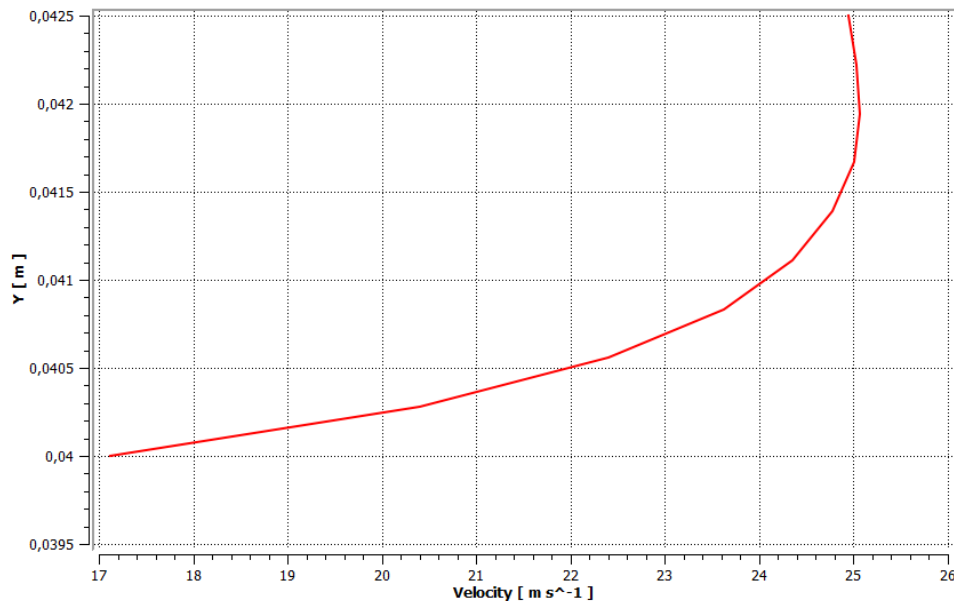


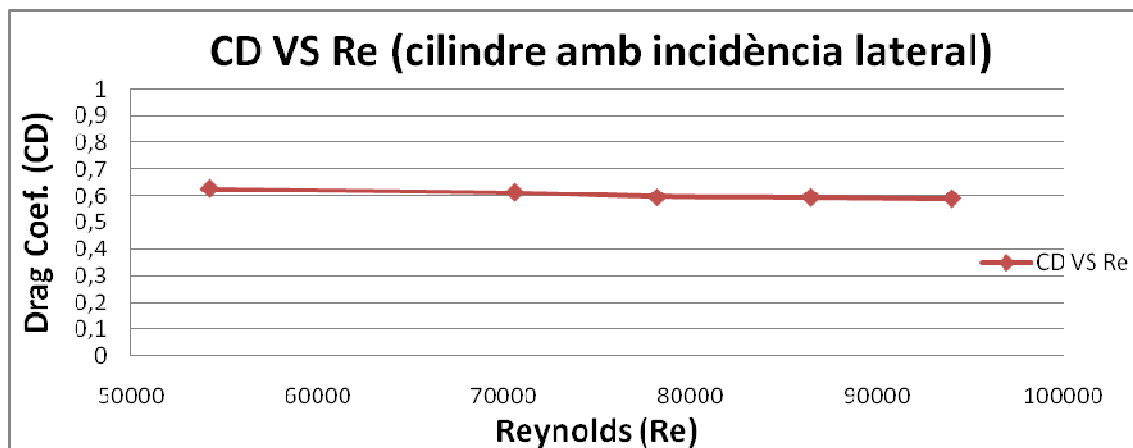
Figura 9.2.5.5.2 Pla i vector de velocitats YZ passant pel centre del cilindre

Si s'observa el perfil de velocitats en una línia vertical que comença en el punt d'alçada màxima, s'aprecia com la capa límit està continguda en el tram vertical de 0,04 i 0,042m.



Gràfic 9.2.5.5.1 Perfil de velocitats

Per últim, com s'ha comentat al principi, tot i tenir un deixant més gran que en el cas d'incidència frontal, com que l'impacte de l'aire amb la maqueta no és tant brusc s'obté un valor de força inferior. Això ressalta la vital importància d'una geometria suau en el primer impacte del fluid amb la maqueta en cas que es vulgui optimitzar l'aerodinàmica d'un cos.



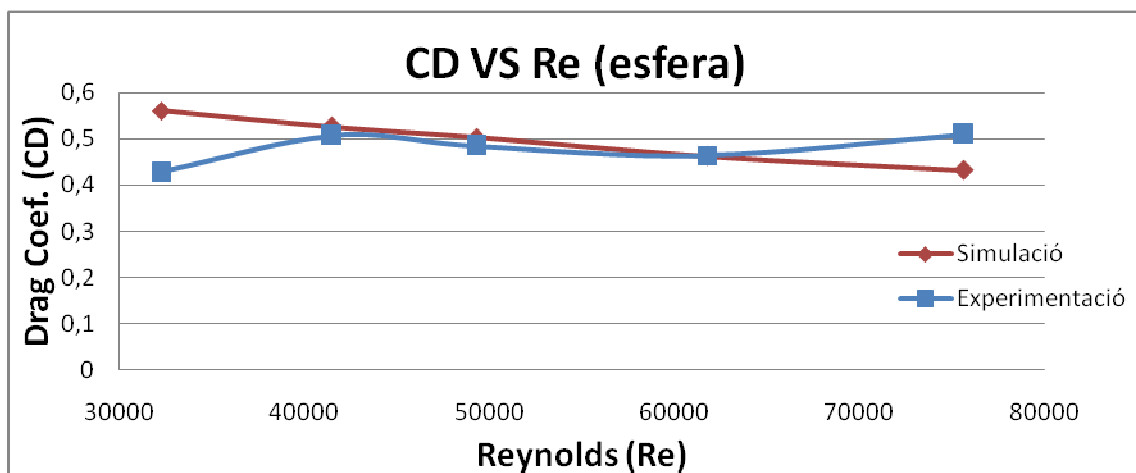
Gràfic 9.2.5.5.2 CD(Re) en el cilindre amb incidència lateral

10. Comparació de valors amb els bibliogràfics

Un cop realitzats tots els experiments i totes les simulacions, ha arribat l'hora de comparar totes les dades i resultats obtinguts amb els valors que mostren els llibres. Per facilitar la comparació, es superposaran els gràfics obtinguts en la simulació i l'experimentació.

10.1. Esfera

Els resultats obtinguts amb la maqueta esfèrica han estat els que es mostren en el següent gràfic:



Gràfic 10.1.1 Comparació de resultats de Cd de l'esfera

Com s'observa en el gràfic, en l'experimentació amb el túnel s'han produït uns altibaixos deguts a l'error que aporta el túnel en la visualització de resultats. Aquest error no es produeix en la simulació. Com s'observa en les imatges a continuació, el valor de Cd hauria d'estar entre 0,39 i 0,52. En la simulació sempre es podria refinar el mallat per obtenir més bons resultats, però a causa de les limitacions per l'ordinador utilitzat no s'ha pogut. Tot i això, tal i com es pot comprovar, els resultats són molt similars.

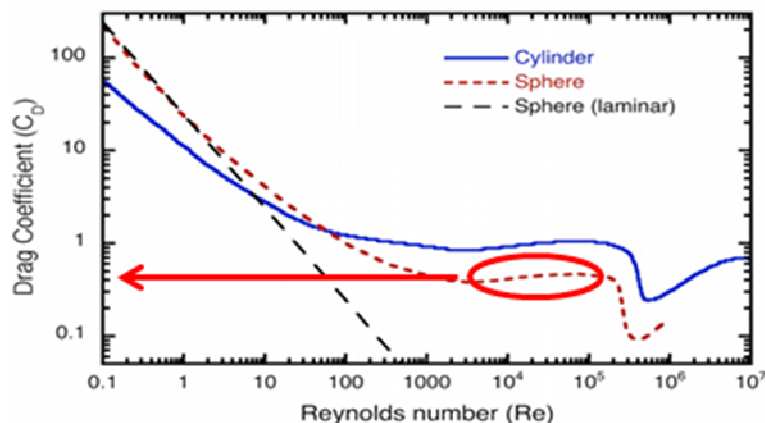



Figura 10.1.1 Valors de Cd mostrats en els llibres I [11]

| | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------------|
| 1. Sphere  | $\frac{\pi D^2}{4}$ | Re | 10^2 | 10^3 | 10^4 | 10^5 | 10^6 | 5×10^6 |
| | | C_D | 1.0 | 0.41 | 0.39 | 0.52 | 0.12 | 0.18 |

Also see Fig. 10-22.

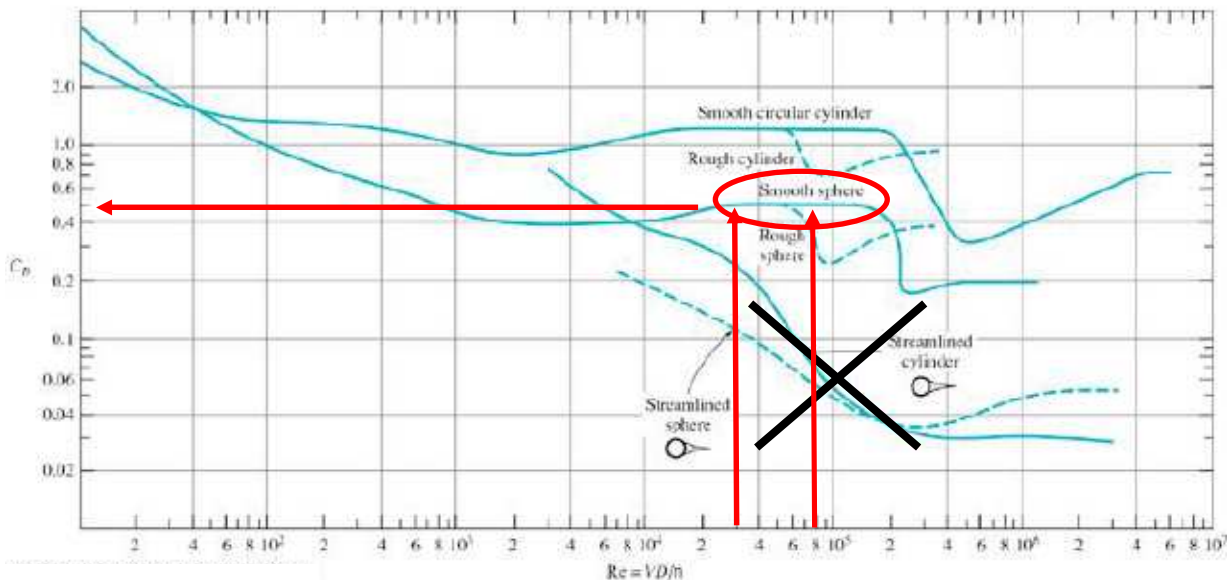
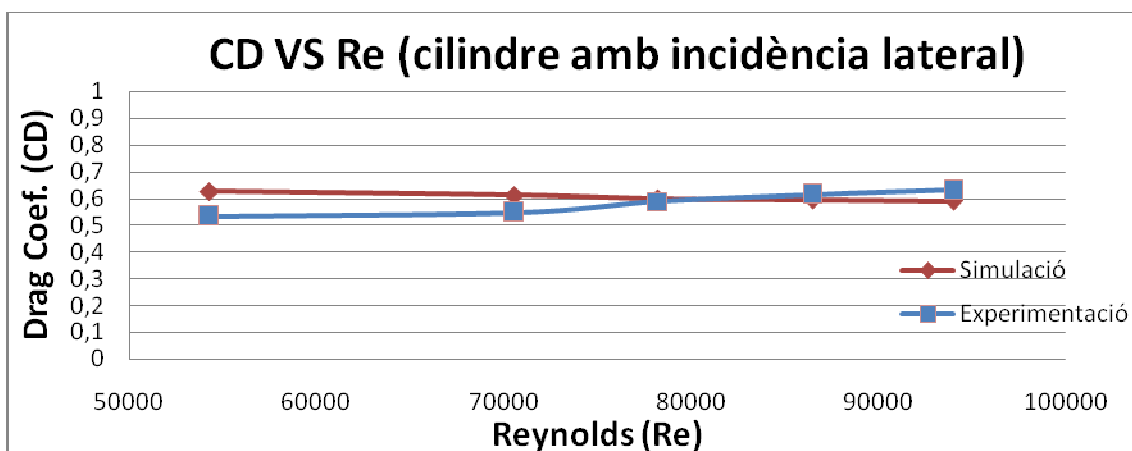


Figura 10.1.2 Valors de C_d mostrats en els llibres II [3] i [1]

10.2. Cilindre amb incidència lateral

Els resultats obtinguts amb la maqueta cilíndrica en l'experiment i simulació pertanyents a la incidència de l'aire per la cara lateral han estat els que es mostren en el següent gràfic:



Gràfic 10.2.1 Comparació de resultats de C_d del cilindre amb incidència lateral

En aquest cas, el coeficient de resistència hauria d'estar al voltant de 0,64 tal i com mostren les imatges finals. Els resultats obtinguts en totes dues proves són bons. Tot i això, en l'experiment amb el túnel es produeix una variabilitat més elevada que en la simulació. Aquesta variabilitat s'atorga a l'error propi del visualitzador del túnel. Pel que fa a la simulació, com s'ha vist en els apartats de resultats, aquest cas té un deixant més gran i lluny del contorn de la peça. Malgrat haver obtingut uns molt bons resultats, aquest fet ha estat decisiu per no haver obtingut una millor precisió, ja que l'operació per refinar el mallat (inflation) no permetia allunyar-se tant de la peça. Per tant quedava part del deixant amb una qualitat més pobre.

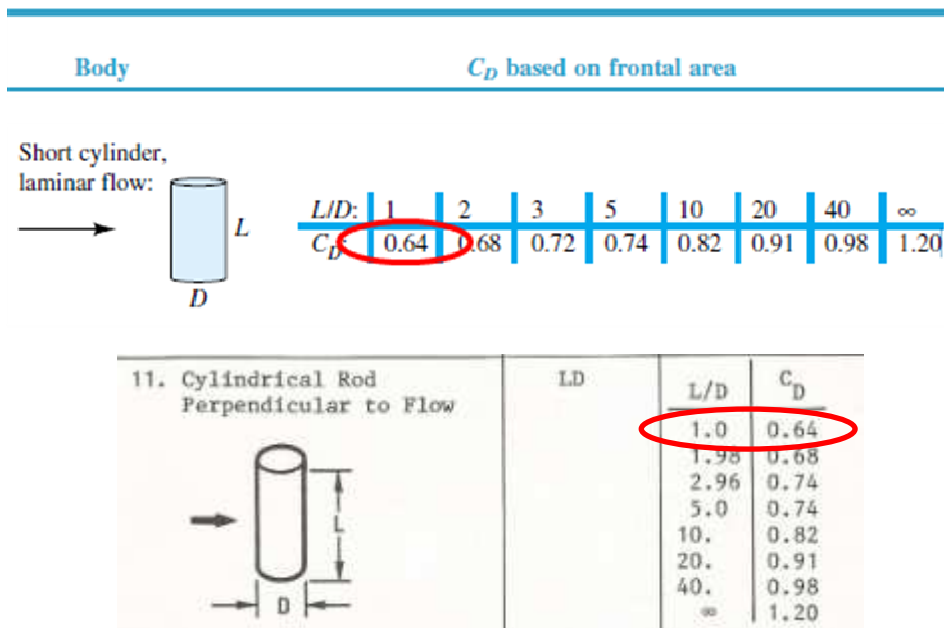
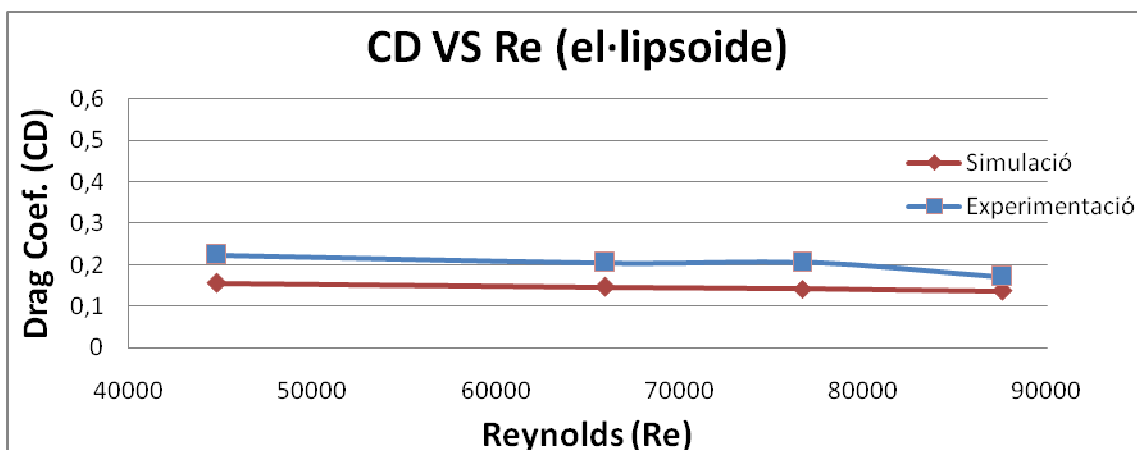


Figura 10.2.1 Valors de C_d mostrats en els llibres I [1] i [3]

10.3. El·lipsoide

Els resultats obtinguts amb la maqueta amb forma d'el·lipsoide han estat els mostrats a continuació:

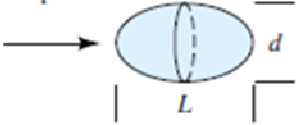


Gràfic 10.3.1 Comparació de resultats de C_d de l'el·lipsoide

Prenent com a referència els valors experimentals que mostren els llibres sobre el coeficient de resistència d'aquesta figura geomètrica, els resultats obtinguts haurien d'estar entre el 0,13 i el 0,3. Com que la relació L/d no és del tot 2, el límit inferior seria lleugerament superior a 0,13. Les dos línies representades estan dintre de l'interval esmentat. Malgrat tenir una tendència molt semblant, les dos línies estan lleugerament separades. Aquest fet s'atribueix, a part de l'error que proporciona el túnel, a la possibilitat de refinar encara més el mallat.

El contingut bibliogràfic utilitzat per consultar els valors del coeficient de resistència han estat els següents:

| Body | Ratio | C_D based on frontal area | |
|------|-------|-----------------------------|-----------|
| | | Laminar | Turbulent |

| | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|------|------|
| Ellipsoid:  | L/d 0.75 | 0.5 | 0.2 |
| | 1 | 0.47 | 0.2 |
| | 2 | 0.27 | 0.13 |
| | 4 | 0.25 | 0.1 |
| | 8 | 0.2 | 0.08 |


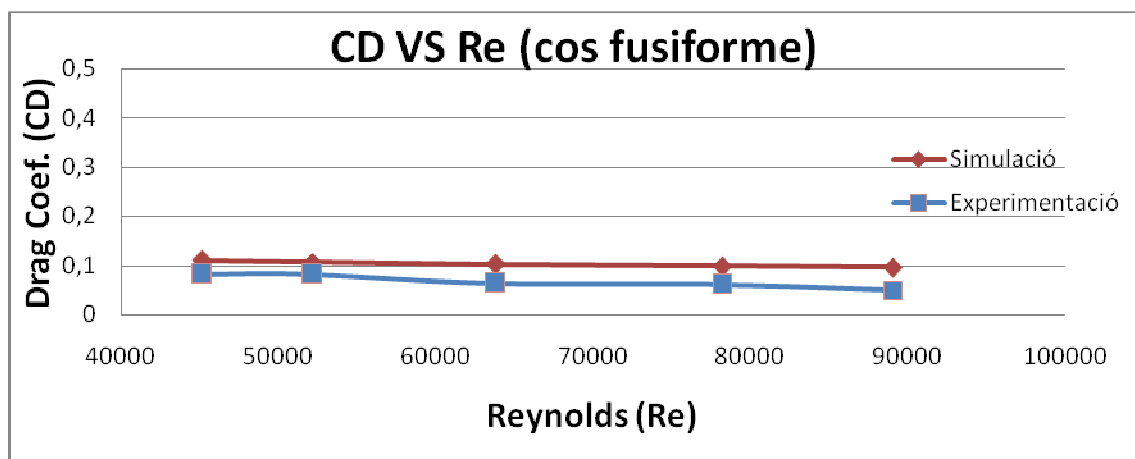
| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4. Ellipsoid of Revolution  | $\frac{\pi D^2}{4}$ $0.44(D/L) + 0.016(L/D) + 0.016(D/L)^{1/2}$ $1 < L/D < 10.$ $Re < 2 \times 10^5, Re_f, 10-102.$ El·lipsoide: $L/d = 14,5/8,5 = 1,7$ $C_d = 0,29829497$ |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Figura 10.3.1 Valors de C_d mostrats en els llibres [1] i [3]

10.4. Cos fusiforme

Els resultats obtinguts amb la maqueta amb forma de cos fusiforme són els següents:



Gràfic 10.4.1 Comparació de resultats de C_d del cos fusiforme

Aquest és un dels experiments més exactes de tots els que s'han realitzat. A més dels bons resultats obtinguts en l'assaig en el túnel i en la simulació, ambdues línies s'apropen al valor de 0,1 que mostren els llibres. Un cop més, el túnel de vent aporta un error que causa una lleugera separació en els gràfics. En aquest cas, però, la simulació mostra un valor quasi exacte de 0,1. Això és degut a que com el deixant i el gruix de la capa límit són petits no ha calgut refinar molt el mallat en parts allunyades de la peça, que és exactament la limitació que té l'ordinador utilitzat.

Com es pot veure a continuació, el valor que mostren els llibres és molt proper a 0,1:

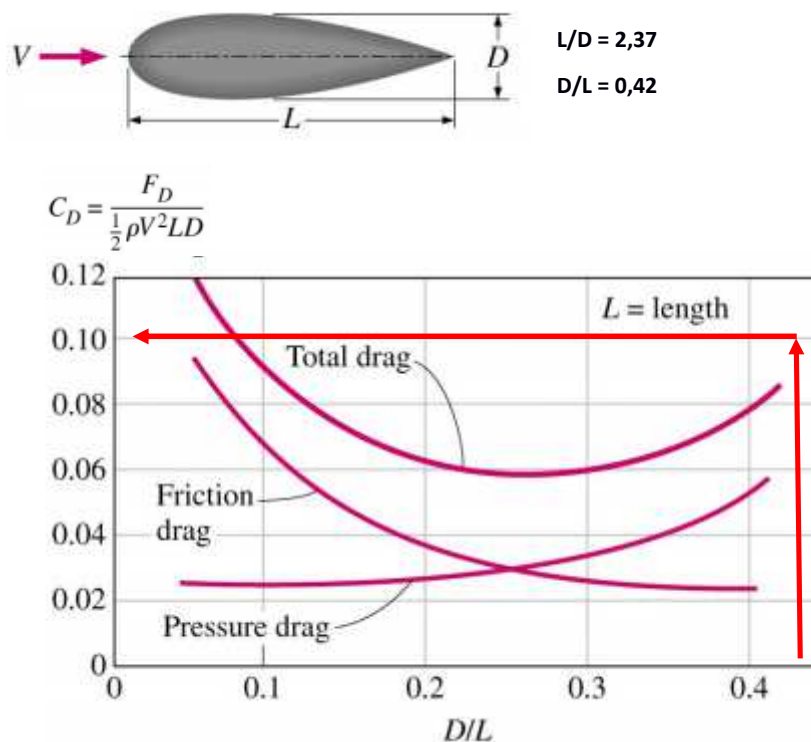
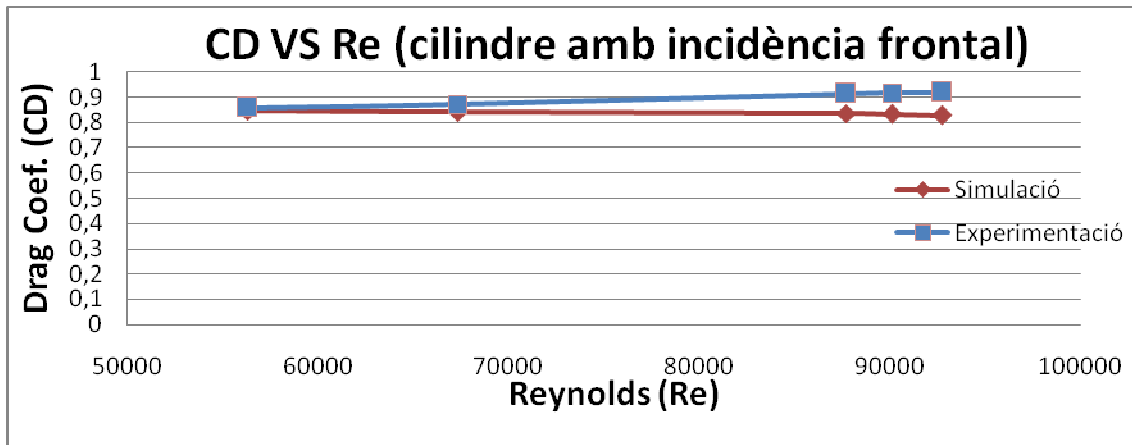


Figura 10.4.1 Valors de C_d mostrats en els llibres [4]

10.5. Cilindre amb incidència frontal

Els resultats obtinguts amb la maqueta cilíndrica en l'experiment i simulació pertanyents a la incidència de l'aire per la cara frontal han estat els que es mostren en el següent gràfic:



Gràfic 10.5.1 Comparació de resultats de C_d del cilindre amb incidència frontal

Tal i com es pot veure en les imatges següents, el C_d hauria de sortir proper a 0,9. Tot i que sembla que ambdós gràfics contenen bons resultats, si l'ordinador ho hagués permès s'hauria preferit refinar el mallat ja que aquest experiment és el que té un deixant més gran. A més, com s'ha vist en l'apartat de resultats, l'impacte frontal de l'aire fa que les línies de corrent s'allunyin de la peça i quedin fora de la zona amb el mallat més fi. Addicionalment, es segueix disposant de l'error en la visualització dels resultats en el túnel de vent. A continuació és mostren els valors obtinguts de la recerca bibliogràfica:

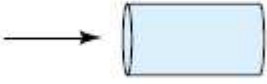
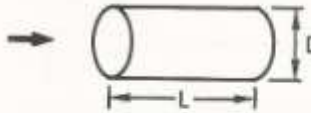
| Body | Ratio | C_D based on frontal area |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------|
| Flat-faced cylinder: | | |
|  | L/d 0.5 | 1.15 |
| | 1 | 0.90 |
| | 2 | 0.85 |
| | 4 | 0.87 |
| | 8 | 0.99 |
| 7. Circular Rod Parallel to Flow | | |
|  | $\frac{\pi D^2}{4}$ | L/D C_D |
| | | ~0 1.15 |
| | | 0.5 1.10 |
| | | 1.0 0.93 |
| | | 1.5 0.85 |
| | | 2.0 0.83 |
| | | 3.0 0.85 |
| | | 4.0 0.85 |
| | | 5.0 0.85 |

Figura 10.5.1 Valors de C_d mostrats en els llibres [1], [3]

11. PLANIFICACIÓ TEMPORAL I ESTUDI ECONÒMIC

11.1. Costos del projecte

Per tal de calcular el cost de la elaboració del treball es tindran en compte tots els aspectes relacionats amb el projecte, des del sou personal de l'enginyer i de les persones implicades en la realització d'aquest, fins a l'ús dels recursos que han estat necessaris.

Per començar, es tracta d'un projecte de 12 crèdits ECTS i cada crèdit representa unes 25 hores. Així doncs, suposant un preu de 10 euros l'hora (preu d'enginyer en pràctiques), deixa un cost al voltant d'uns **3.000€** destinats a contractar l'enginyer responsable del projecte. A més, cal incloure a l'equació les hores dedicades del tutor del treball. En total, al llarg del quadrimestre, el tutor ha dedicat 2 hores setmanals (40 hores totals) a dirigir i supervisar la feina feta. Tenint en compte un preu per hora de treball d'uns 30 euros d'una persona especialitzada i experta en la matèria com es el cas del tutor (enginyer sènior), al cost se li ha d'afegir la xifra de **1.200€**

A més, també s'han de tenir en compte les tecnologies emprades al llarg de la realització del treball. La més important és la de l'ús del principal programari, l'Ansys Workbench 14.5. El lloguer anual d'aquest programari, incloent-hi la llicència acadèmica és de **26.000€**. Per poder fer anar les simulacions numèriques amb el programari caldrà un ordinador prou potent, en aquest cas s'ha utilitzat un portàtil d'uns **800€**. No cal oblidar, que per dur a terme el treball s'ha utilitzat el pack Microsoft Office i el SolidWorks per elaborar la geometria i importar-la a l'Ansys. Aquestes dos llicències anuals han costat respectivament **120€** i **300€**

Una part important del cost va destinada a la utilització del túnel de vent i el seu consum. El preu del lloguer d'un túnel de vent és de 2.000€/h. Per un total de 4 hores utilitzades, representa un cost de **8.000€**. Pel que fa al seu consum, el motor d'engegada és de 18,38KW. Tenint en compte les 4 hores de treball del túnel i que el preu de l'electricitat en el moment de l'ús era de 0,11946 €/kWh, el consum fa que s'afegeixi al cost **8,78€**

Tot i que el seu cost sigui molt inferior a la resta, no cal oblidar l'elaboració de les maquetes i la seva manipulació per poder-les fixar a la cambra d'assaig del túnel. Aquesta part va costar **35€**

Per últim, s'ha d'afegir el cost del material d'oficina com ara els folis i el material d'escriptura, a més d'una impressora amb els corresponents cartutxos de tinta. Tot això ha generat una despesa aproximada de **100€**

11.2. Balanç de costos

Tot aquest balanç de costos s'il·lustra perfectament a les taules que es mostren a continuació:

| RECURSOS HUMANOS | | | |
|------------------|-------|------------|-----------------|
| Descripció | hores | Preu [€/h] | Cost [€] |
| Enginyer júnior | 300 | 10,00 | 3.000,00 |
| Enginyer sènior | 40 | 30,00 | 1.200,00 |
| TOTAL | | | 4.200,00 |

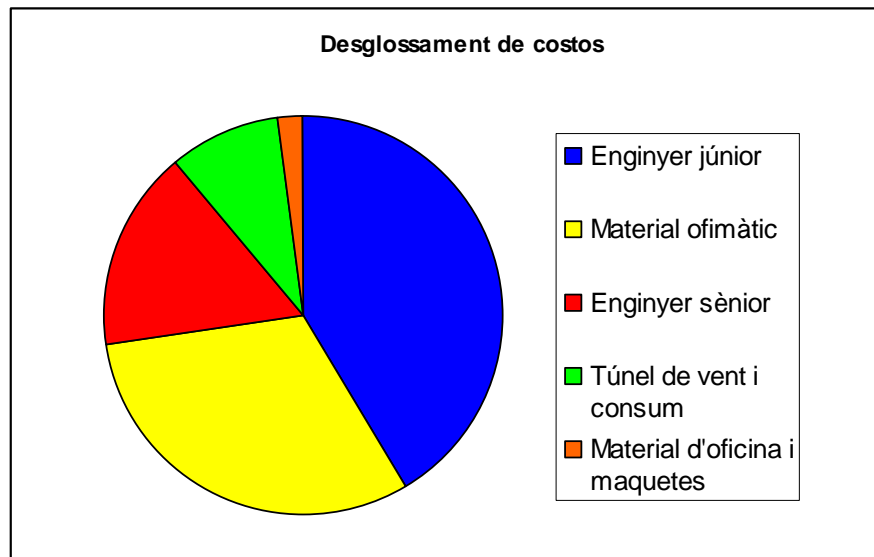
Taula 11.2.1 Cost dels Recursos Humans

Com que la duració del treball és de setembre a gener, el total d'anys són aquests 4 mesos dividits pels 12 mesos que té un any. Per tant el total d'anys és de 0,33 anys.

| RECURSOS MATERIALES | | | | | |
|------------------------------------|-----------|-------------------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|
| Descripció | Cost [€] | Horitzó d'amortització [anys] | Amortització anual [€/any] | Temps total [anys] | Amortització acumulada [€] |
| Ordinador portàtil | 800,00 | 4 | 200,00 | 0,33 | 66,00 |
| ANSYS Workench 14.5 (anual) | 26.000,00 | 4 | 6500,00 | 0,33 | 2145,00 |
| Llicència Microsoft Office (anual) | 120,00 | 4 | 30,00 | 0,33 | 9,90 |
| Llicència SolidWorks (anual) | 300,00 | 4 | 75,00 | 0,33 | 31,50 |
| Material d'oficina | 100,00 | - | - | - | 100,00 |
| Elaboració de maquetes | 35,00 | - | - | - | 35,00 |
| Túnel de vent | 8.000,00 | 4 | 2.000,00 | 0,33 | 660,00 |
| Consum túnel de vent | 8,78 | - | - | - | 8,78 |
| TOTAL | | | | | 3.056,18 |

Taula 11.2.2 Cost dels Recursos Materials

Per analitzar aquests costos i visualitzar-los de manera gràfica, a continuació es mostra el desglossament d'aquests:



Gràfic 11.2.1 Desglossaments dels costos

11.3. Pressupost del projecte

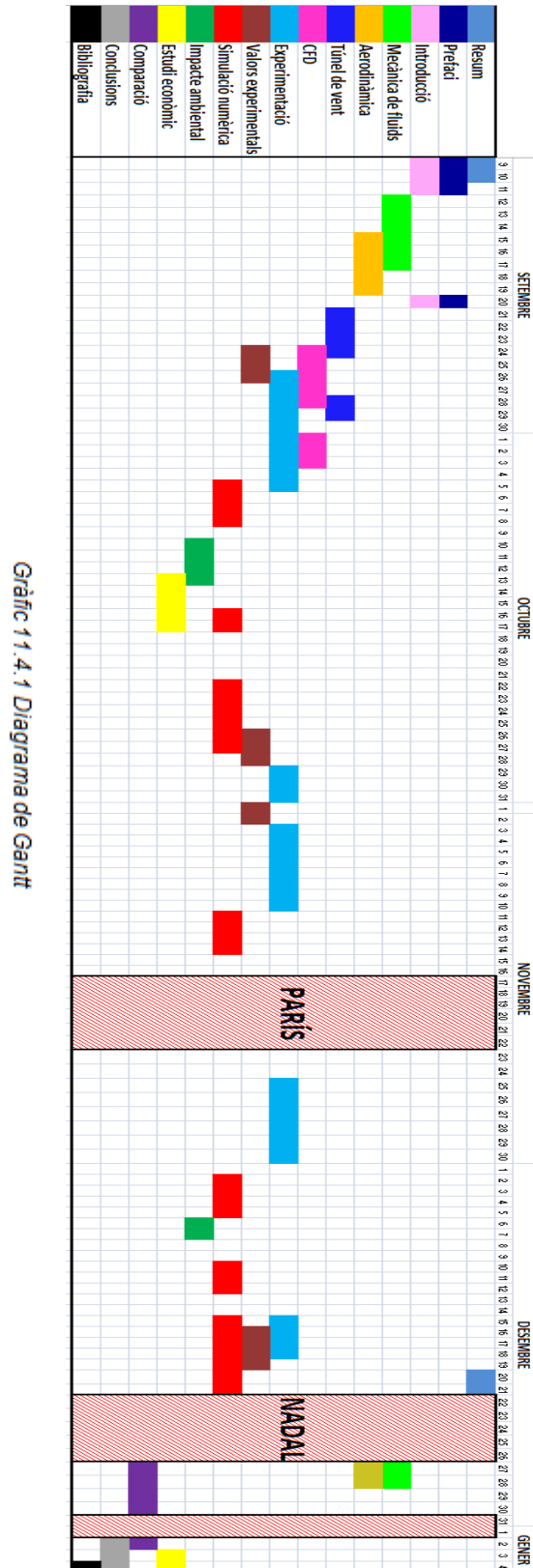
A la següent taula s'il·lustren el pressupost d'execució material (PEM) fent referència a els costos materials i de mà d'obra, el pressupost de contracte (PC), és a dir l'import que es cobra al contractista tot afegint la part proporcional a les despeses generals (13%) i el benefici industrial (6%); i per últim el pressupost total (PT) que és el total a importar. Així doncs, el pressupost total del projecte és de **10.448,17€**

| Pressupost total | |
|---------------------------------------------|------------------|
| Descripció | Cost [€] |
| Cost recursos humans | 4.200,00 |
| Cost recursos materials | 3.056,18 |
| Pressupost d'execució material (PEM) | 7.256,18 |
| Despeses generals (13%) | 943,30 |
| Benefici industrial (6%) | 435,37 |
| Pressupost de contracte (PC) | 8.634,85 |
| Impost sobre el valor afegit (IVA 21%) | 1.813,32 |
| Pressupost total (PT) | 10.448,17 |

Taula 11.3.1 Pressupost total del projecte

11.4. Planificació temporal

A continuació es mostra un diagrama de Gantt, on es defineix la planificació temporal que s'ha seguit en el desenvolupament del projecte.



12. Impacte ambiental

12.1. Fonts de contaminació per l'elaboració del projecte

Per a l'estudi ambiental d'aquest treball s'han de tenir en compte tant la part de simulació com, sobretot, la part experimental realitzada amb el túnel de vent.

La primera, en tractar-se d'un estudi de simulació, l'impacte ambiental és escàs i fins i tot es podria considerar nul. Un dels avantatges dels que disposa la simulació, entre uns altres, és la no utilització de recursos contaminants com poden ser motors de combustió, bombes hidràuliques i diferents màquines necessàries per a la realització d'experiments de camp o de laboratori. En canvi, per a la simulació s'ha gastat energia per mantenir un ordinador encès i elements de climatització de l'estudi, que en qualsevol cas, solen ser bastant inferiors a les despeses d'energia que s'haguessin generat amb l'experimentació. Per tant, en aquest apartat del treball es conclou que l'impacte mediambiental és l'estalvi energètic que suposa la realització de l'estudi amb un programari CFX davant de l'estudi experimental equivalent.

Pel que fa a la part experimental, aquesta és molt més extensa. La despesa energètica d'un túnel de vent depèn del mètode d'engegada del ventilador. El ventilador del túnel de vent de l'ETSEIB, encarregat de fer circular l'aire pel seu interior, s'acciona mitjançant un motor elèctric. És per aquest motiu que s'han de tenir en compte les emissions relacionades amb el consum elèctric.

Per calcular les emissions associades al consum elèctric, s'ha d'aplicar un factor d'emissió de contaminants atribuïble al consum elèctric, també conegut com mix elèctric (expressat en g de contaminant / KWh), que fa referència a la generació d'energia elèctrica.

A Catalunya l'electricitat que es consumeix (i no autogenerada) prové de la xarxa elèctrica peninsular. Per tant, les dades que s'utilitzin han de correspondre a les de la xarxa elèctrica peninsular. Avui dia, la generació de l'energia elèctrica es reparteix de la següent manera:

- | | |
|---------------------|--------------------|
| • 5,4% Petroli | • 13,8% Nuclear |
| • 23,3% Gas natural | • 19,9% Renovables |
| • 37,6% Carbó | |

12.2. Principals contaminants

A continuació es comentaran breument els principals contaminants causats al generar l'energia elèctrica. Aquests són el **diòxid de carboni** (CO_2), el **diòxid de sofre** (SO_2) i els **òxids de nitrogen** (NO_x):

Les **centrals tèrmiques** generen contaminants degut a dos causes principals. Per un cantó, la **crema de combustibles** fòssils com el carbó o el fuel que generen cendres i fums entre els quals s'hi troba emissions de CO_2 , SO_2 i NO_x . D'altra banda, generen també un **canvi tèrmic** en l'aigua que usen per la refrigeració.

El CO_2 és un dels gasos que afavoreixen l'**efecte hivernacle**. Aquest efecte és el responsable que la terra tingui temperatura. Per un excés d'aquest gas a l'atmosfera es pot produir un increment d'aquesta temperatura. Hi ha maneres, però, de reduir el CO_2 , la més extensa és amb l'ús de filtres que el retenen.

El SO_2 i el NO_x són els causants de la pluja àcida. L'associació dels òxids amb l'oxigen i l'aigua formen àcids nítrics i sulfúrics. Aquests àcids canvien el PH de la pluja i aquesta acidifica els rius i agües matant els sers vius que hi viuen. Un altre efecte de la pluja àcida és la deposició de protons H^+ que arrossegueu certs ions del terra empobrint els nutrients dels ecosistemes. Per eliminar aquests contaminants es realitzen diferents tractaments, com per exemple la introducció de convertidors catalítics en les centrals (acceleren les reaccions químiques que descomponen i oxiden els gasos contaminants transformant-los en gasos innocus pel medi ambient) o l'adició de components alcalins en els rius, ja que reaccionen ràpidament amb l'aigua i l'oxigen.

12.3. Contaminació produïda

Feta aquesta breu explicació, a continuació es procedirà a realitzar el càlcul de l'impacte ambiental. La despesa energètica d'un túnel de vent depèn del mètode d'engegada del ventilador d'aquest. El ventilador del túnel de vent de l'ETSEIB encarregat de fer circular l'aire pel túnel de vent, s'acciona mitjançant un motor elèctric d'uns **25 CV**, és a dir uns **18,38 KW** de potència. Segons les dades del Balanç elèctric que facilita la xarxa elèctrica espanyola (REE), les emissions específiques dels principals contaminants en el mes d'Octubre de 2015 són les següents:

- Diòxid de carboni (CO_2): 0,280 kg/kWh
- Diòxid de sofre (SO_2): 0,650 g/kWh
- Òxids de nitrogen (NO_x): 0,442 g/kWh

Per tant, si el motor amb el que s'ha treballat proporciona una potència de 18,38 KW, això implica unes emissions per hora de funcionament de:

- Diòxid de carboni (CO_2): 5,15 kg/h
- Diòxid de sofre (SO_2): 11,95 g/h
- Òxids de nitrogen (NO_x): 8,12 g/h

En conclusió, havent treballat amb el motor un total de 4 hores, les emissions totals produïdes durant el treball han estat de:

- Diòxid de carboni (CO_2): 20,60 kg (La combustió d'un litre de gasolina genera 2,3 kg de CO_2)
- Diòxid de sofre (SO_2): 47,80 g
- Òxids de nitrogen (NO_x): 32,48 g

CONCLUSIONS

Un cop ha conclòs el treball "el túnel de vent com eina d'assaig aerodinàmic", compostat per diferents experiments amb el túnel de vent per obtenir els valors del coeficient de resistència a l'avanç més les respectives simulacions a ordinador, es pot fer un recull general dels resultats obtinguts, les dificultats i facilitats, les discrepàncies obtingudes al comparar els valors i les conclusions extretes.

S'han assolit els objectius del projecte que d'entre altres eren:

- Comparar els resultats experimentals amb els obtinguts de la simulació numèrica i els que hi ha en els llibres de Mecànica de Fluids.
- Saber comentar els errors i les discrepàncies entre els diferents resultats obtinguts.
- I els personals, d'haver tingut l'oportunitat de realitzar un experiment amb una eina tant primordial en el camp de la Mecànica de Fluids i l'Aerodinàmica, el túnel de vent, i d'haver conegut el seu funcionament.

S'han millorat els coneixements adquirits en les diferents assignatures del grau, principalment en la Mecànica de Fluids

Conclusions de la part experimental:

- Soltadament, al canviar de maqueta es va començar a obtenir valors erronis de força ja que a mesura que la velocitat era més alta el valor de la força disminuïa (enlloc d'augmentar). Va ser llavors quan es va optar per reiniciar el funcionament del túnel i seguir prenent les mesures.
- Addicionalment, el mesurador de força oscil·lava de manera que el resultat a anotar era el valor més repetitiu i en alguns casos s'ha fet la mitjana entre els valors extrems. Va ser durant el tractament de dades que va ser detectat l'error proporcionat pel túnel.
- Això va forçar a usar els valors de la corba de regressió, obtinguda al graficar la força envers la velocitat, alhora de calcular el coeficient de resistència a l'avanç.

Conclusions de la part de simulació numèrica:

- Es van trobar dificultats en la introducció de la geometria a el programari. Això va ser degut a la prèvia formació en geometries 2D, però no en 3D com és el cas a tractar. Malgrat tot, es va poder superar exitosament aquest inconvenient.
- L'únic inconvenient trobat durant la simulació va ser la limitació de l'ordinador alhora d'introduir mallats amb un gran nombre d'elements.

Pel que fa a l'obtenció de resultats, es pot concloure que el treball ha acabat mostrant els resultats esperats (valors mostrats en els llibres). Tot i això, com s'ha pogut veure en l'apartat de comparació de valors, han existit unes diferències. Aquestes discrepàncies s'atribueixen tant a l'error aportat pel túnel de vent com a la possible millora del mallat en la simulació.

Com s'ha comentat anteriorment, els experiments i les simulacions s'han vist afectats per errors que han afectat a l'obtenció dels resultats. Aquests errors són els següents:

- Oscil·lació en la mostra de valors per part del mesurador de força del túnel de vent.
- Impediment alhora de millorar el mallat en la simulació, degut a la limitació de l'ordinador usat.

Tot i aquests errors, els resultats obtinguts han estat molt bons:

Esfera

El valor de C_d hauria d'estar entre 0,39 i 0,52. Els resultats de l'experiment amb el túnel estan continguts dins aquest interval, mentre que en la simulació el primer assaig s'excedeix lleugerament per sobre del 0,55.

Cilindre amb incidència lateral

En aquest cas, el coeficient de resistència a l'avanç hauria d'estar al voltant de 0,64. Els resultats de la simulació són molt convenients ja que quasi no s'allunyen d'aquest valor. Pel que fa a l'experiment amb el túnel, els dos primers valors estan més a prop del 0,5 que del 0,6.

El·lipsoide

Els resultats obtinguts haurien d'estar entre el 0,13 (lleugerament per sobre) i el 0,3. Ambdós resultats estan dintre de l'interval esmentat. La simulació ha obtingut valors centrats en el 0,15 (línea recta) mentre que l'assaig amb el túnel ha obtingut valors lleugerament per sobre del 0,2 (a excepció de l'últim valor).

Cos fusiforme

Aquest és un dels experiment més exacte de tots els que s'han realitzat, on ambdues línies de resultats s'apropen al valor de 0,1 que mostren els llibres.

Cilindre amb incidència frontal

Aquí, el C_d hauria de sortir proper a 0,9. En aquest apartat els resultats obtinguts amb el túnel (propers a 0,9) són més bons que els de la simulació (propers a 0,85).

Agraïments

Acabat el treball, agrair el professor Enric Trillas (Departament de Mecànica de Fluids) tot el recolzament i suport rebut al llarg d'aquests quatre mesos. Ha estat un plaer ser aconsellat i dirigit per ell.

Cal agrair a el professor Xavier Escaler (Departament de Mecànica de Fluids), addicionalment, ja que tot i no ser el tutor del projecte s'ha mostrat obert i totalment disponible a resoldre els dubtes que sorgissin relacionats amb el programari *ANSYS CFX*.

Per últim es d'agrair l'ajuda rebuda per la merceria "La Marieta" sobre els tipus de fils amb els que era més aconsellable realitzar l'assaig.

Bibliografia

- [1] FRANK M. WHITE, *Fluid Mechanics (7th edition)*. McGraw-Hill Co, capítol 7
- [2] ROBERT L. MOTT, *Applied Fluid Mechanics (6th edition)*. Pearson Education, capítol 7 i 8.
- [3] ROBERT D. BLEVINS, *Applied Fluid Dynamics Handbook*. Krieger Publishing Co, capítol 10.
- [4] ROBERT A. GRANGER, *Fluid Mechanics*. Dover Publications, capítol 14
- [5] DAVID GORDON WILSON, *Bicycling Science*. Rev. ed. of: Bicycling science / Frank Rowland Whitt. 2nd ed. c1982, capítol 5.
- [6] Apunts de l'assignatura troncal de Grau en Tecnologies Industrials '*Mecànica de Fluids*', Barcelona: ETSEIB-UPC.
- [7] Apunts de l'assignatura optativa de Grau en Tecnologies Industrials '*Computational Fluid Dynamics*', Barcelona: ETSEIB-UPC.
- [8] Tutorial d'ANSYS CFX: *Introduction to ANSYS CFX*, 2012 ANSYS, Inc.
- [9] Nancy Hall. *Beginner's Guide to Aerodynamic*. NASA Official: Nancy Hall. Mayo 2015 [en línea] <<https://www.grc.nasa.gov/www/k-2/airplane/index.html>>.
- [10] Nancy Hall. *WindTunnel Parts*. NASA Official: Nancy Hall. Mayo 2015 [en línea] <<https://www.grc.nasa.gov/www/K-12/airplane/tunpart.html>>
- [11] Nancy Hall. *Drag of a sphere*. NASA Official: Nancy Hall. Mayo 2015 [en línea] <<https://www.grc.nasa.gov/www/K-12/airplane/dragsphere.html>>
- [12] Sandra May. *What is aerodynamics?* NASA Official: Sandra May Setiembre 2015 [en línea] <<http://www.nasa.gov/audience/forstudents/k-4/stories/nasa-knows/what-is-aerodynamics-k4.html>>
- [13] Sandra May. *What are wind tunnels?* NASA Official: Sandra May Setiembre 2015 [en línea] <<http://www.nasa.gov/audience/forstudents/k-4/stories/nasa-knows/what-are-wind-tunnels-k4.html>>
- [14] University of London, Discovery in science and engineering 1886-2010 [en línea] <http://www.library.qmul.ac.uk/archives/archives_galleries/discovery>
- [15] Paul Sorene, Vintage NASA wind tunnels [en línea] <<http://flashbak.com/incredible-photos-of-vintage-nasa-wind-tunnels-38212/>>
- [16] Aubrey Jaffer, First test of wind tunnel [en línea] <<http://voluntocracy.blogspot.com.es/2014/07/first-test-of-wind-tunnel.html>>

- [17] Nick Christensen, Wind tunnel [en línea]
< <http://www.cafespa.com/index.php?news=000189&title=Ferrari-Wind-Tunnel-Reopened&img=2>>
- [18] Isaac Prada y Nogueira El túnel de viento [en línea]
< https://www.icaei.es/contenidos/publicaciones/anales_get.php?id=1383>
- [19] Red eléctrica de España, Balance diario [en línea]
<<http://www.ree.es/es/actividades/balance-diario>>
- [20] Endesa Educa, Energía eléctrica y medio ambiente [en línea]
< http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/el-uso-de-la-electricidad/xxv.-la-energia-electrica-y-el-medio-ambiente>